ENERSTOCK 85

III International Conference on Energy Storage for Building Heating and Cooling

III[e] Conférence internationale sur le stockage de l'énergie pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments

September 22 - 26 septembre
1985
Toronto, Canada

abstracts/ résumés

Canada

89-00268/

ENERSTOCK 85

III International Conference on
Energy Storage for Building
Heating and Cooling

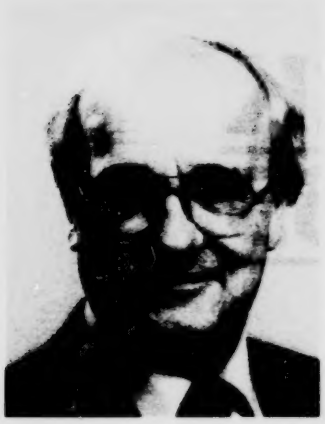
III[e] Conférence internationale
sur le stockage de l'énergie
pour le chauffage et le
refroidissement des bâtiments

September 22 - 26 septembre 1985
Toronto, Canada

abstracts/ résumés

Organized for Public Works Canada by: /
Organisée pour Travaux publics Canada par:
Intertask Limited
Ottawa, Canada

Cat. No. W62-10 / 1-1985-1
ISBN 0-662-53940-0



MESSAGE FROM THE MINISTER OF PUBLIC WORKS CANADA

It gives me great pleasure to welcome all ENERSTOCK 85 participants. As well, I wish all of our international guests a pleasant and rewarding stay in Toronto and Canada.

This conference is sponsored by Public Works Canada because of our own development work in the areas of aquifer thermal energy storage and seasonal ice storage. Our involvement in the building delivery process from concept initiation, detailed design, construction management, commissioning, through operation and retrofit gives Public Works a keen interest in the future of seasonal thermal energy storage applied to building heating and cooling applications.

ENERSTOCK 85 will be an opportunity for the international community to exchange information and experiences. Such interchange has already been instrumental in advancing the technology to its present state.

I wish you every success in your discussions and I look forward to reviewing the present state-of-the-art and future plans to implement promising systems.

Roch La Salle
Minister of Public Works Canada

MESSAGE DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS CANADA

Je suis très heureux d'accueillir tous les participants à ENERSTOCK 85. Je tiens également à souhaiter à tous nos invités de l'étranger un séjour agréable et enrichissant à Toronto et au Canada.

Travaux publics Canada parraine cette conférence en raison de ses propres travaux de développement dans les domaines du stockage de l'énergie thermique en milieu aquifère et du stockage saisonnier dans la glace. Notre participation au processus de la construction, depuis la définition du concept, la conception détaillée, la gestion de la construction, l'adjudication des contrats, sans oublier le fonctionnement et la modernisation, explique le vif intérêt que Travaux publics Canada porte à l'avenir du stockage saisonnier de l'énergie thermique pour le chauffage et le refroidissement des immeubles.

ENERSTOCK 85 donnera à la collectivité internationale l'occasion d'échanger de l'information et des expériences. Ces échanges ont déjà contribué à faire progresser la technologie jusqu'à son stade actuel.

Je vous souhaite tout le succès possible dans vos délibérations et j'anticipe avec plaisir l'occasion de passer en revue les plans actuels et futurs de mise en oeuvre de nouveaux systèmes prometteurs.

Le ministre des Travaux publics Canada

Roch La Salle

MESSAGE FROM THE CHAIRMAN

It has been a decade since research efforts were initiated to answer the technical questions restraining the realization of the potential benefits of seasonal thermal energy storage applications and to evaluate the performance of seasonal storage as a component in actual systems. The contributions contained in this volume of Abstracts clearly indicate that these efforts are now maturing with the design, construction, operation, and evaluation of a remarkable variety of field experiments and full-scale system applications. These systems employ various storage types, energy sources, heating and cooling loads, system designs, and operating strategies ranging from the use of winter as an energy source to chill aquifer water for summer cooling of textile mills to the use of solar energy stored in clay for winter heating with a heat pump.

Cost-effective systems do exist. They are usually based on some local geological or economic factor not universally applicable to other sites. However, the existence of such systems provides a foundation for future expansion. The interaction among researchers, contractors, designers, operators, and the attention to actual building requirements and costs have contributed greatly to our present state of knowledge. There have been many hard lessons and some pleasant surprises. Concensus on the most promising system types is emerging and is evident from a careful reading of the ENERSTOCK 85 papers. I trust that you will find these Proceedings of assistance in your own work.

Edward Morofsky

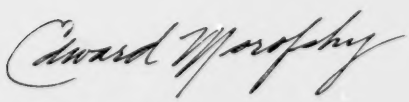
Edward Morofsky
Chairman
ENERSTOCK 85

MESSAGE DU PRÉSIDENT

Il y a dix ans que les chercheurs ont commencé à essayer de répondre aux difficultés techniques qui empêchent de concrétiser les avantages que pourraient présenter les applications du stockage saisonnier de l'énergie thermique et d'évaluer le rendement du stockage saisonnier comme composante de systèmes en service. Les communications présentées dans ce volume des actes indiquent clairement que ces efforts commencent à porter fruit, avec la conception, la construction, le fonctionnement et l'évaluation d'une variété remarquable d'expériences pratiques et d'applications dans des grands systèmes. Ces systèmes emploient divers types de stockage, sources d'énergie, charges de chauffage et de refroidissement, conceptions de systèmes et stratégies d'exploitation, allant de l'utilisation de l'hiver comme source de l'énergie pour refroidir l'eau des aquifères pour le refroidissement estival des usines de textiles, jusqu'à l'utilisation de l'énergie solaire stockée dans la glaise pour le chauffage hivernal au moyen d'une pompe à chaleur.

Il existe déjà, bien sûr, des systèmes efficaces par rapport aux coûts. Ils sont habituellement fondés sur un facteur géologique ou économique local qui n'est pas universellement applicable en d'autres lieux. Cependant, ces systèmes, de par leur existence même, sont la base de l'expansion future. L'interaction entre chercheurs, entrepreneurs, concepteurs et exploitants et l'attention portée aux exigences et aux coûts de la construction même ont contribué pour beaucoup aux connaissances actuelles. Il y a eu un grand nombre de dures leçons et quelques surprises agréables. Il commence à y avoir un consensus sur les types de systèmes les plus prometteurs, comme il ressort d'une lecture attentive des communications présentées à ENERSTOCK 85. J'espère que ces actes vous seront utiles dans vos travaux.

Président
ENERSTOCK 85



Edward Morofsky

ORGANIZATION OF ENERSTOCK 85

At the June 1983 "International Conference on Subsurface Heat Storage in theory and practice", Canada was requested to organize the next conference. I was able to arrange funding from Canadian federal energy R&D monies to host what has become known as ENERSTOCK 85. A contract for general secretariat services was arranged with Intertask Limited of Ottawa. Early collaboration with the Swedish Building Research Council and L'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, as well as with the U.S. Department of Energy, was initiated. This collaboration resulted in comprehensive Swedish and French efforts to present a national representation of their current storage work. As a result of an official government interchange between Public Works Canada and the Chinese Ministry of Geology and Mineral Resources in the area of aquifer thermal energy storage, I was able to visit project sites in Shanghai and Jiangsu Province. Several of the Chinese contributions to ENERSTOCK 85 are from installations visited during this technical exchange.

The Scientific Advisory Committee met in Toronto to set out the broad guidelines for ENERSTOCK 85. Members of the Committee assisted with the jurying of abstracts. Session Chairmen reviewed the finished papers and arranged the program for their sessions. The bulk of this work was, by necessity, done by the Canadian Chairmen. As editor of the Proceedings, I made a determined effort to bring all papers up to a minimum level of comprehensibility and to shorten some overly lengthy papers. I take personal responsibility for this editing and trust that the affected papers have been improved. I wish to thank the Scientific Advisory Committee, the Session Chairmen, and the authors of the technical papers for their contributions to ENERSTOCK 85.

Edward Morofsky

Edward Morofsky
Chairman
ENERSTOCK 85

ORGANISATION D'ENERSTOCK 85

Lors de la Conférence internationale sur la théorie et la pratique du stockage de la chaleur dans le sous-sol en juin 1983, le Canada a été invité à organiser la prochaine conférence. J'ai pu obtenir du gouvernement fédéral canadien des fonds de R&D en énergie pour accueillir ENERSTOCK 85. Nous avons passé un contrat pour les services de secrétariat général avec Intertask Limited d'Ottawa. Nous avons obtenu dès le départ la collaboration du Conseil suédois de la recherche en bâtiment et de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, ainsi que du ministère de l'Énergie des États-Unis. Cette collaboration a amené les Suédois et les Français à faire des efforts considérables pour l'organisation d'une représentation nationale de leurs travaux actuels de stockage. Grâce à un échange officiel au niveau gouvernemental entre Travaux publics Canada et le ministère chinois de la Géologie et des Ressources minérales dans le domaine du stockage de l'énergie thermique dans les nappes aquifères, il m'a été donné de visiter des chantiers à Shanghai et dans la province de Jiangsu. Plusieurs des contributions de la Chine à ENERSTOCK 85 viennent d'installations visitées à l'occasion de cet échange technique.

Le Comité consultatif scientifique s'est réuni à Toronto pour définir les grandes lignes d'ENERSTOCK 85. Les membres du Comité ont participé au choix des résumés. Les présidents de séance ont revu le texte final des communications et organisé le programme de leurs séances. Le gros de ce travail a donc forcément été réalisé par les présidents canadiens. En tant qu'éditeur des Actes, j'ai fait un effort déterminé pour assurer un niveau minimum d'intelligibilité de toutes les communications et pour en abréger certaines qui étaient trop longues. J'assume la responsabilité de ce travail d'édition, et j'espère que les textes concernés ont été améliorés. Je tiens à remercier de leurs contributions à ENERSTOCK 85 le Comité consultatif scientifique, les présidents de séance, et les auteurs des communications techniques.

Président
ENERSTOCK 85

Edward Morofsky

Edward Morofsky

Scientific Advisory Committee/
Comité consultatif scientifique

Chairman/Président
Edward Morofsky
Public Works Canada/Travaux publics Canada

CANADA
Frank Hooper
Hooper and Angus Associates Ltd.

Otto Svec
National Research Council of Canada/Conseil national de recherches du Canada

Bob Tamblyn
Engineering Interface Ltd.

PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA/RÉPUBLIQUE POPULAIRE DE CHINE
Li Xingjian
Chinese Bureau of Science and Technology

DENMARK/DANEMARK
Bjorn Qvale
Technical University of Denmark

FRANCE
Yves Boileau
Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie

FEDERAL REPUBLIC OF GERMANY/RÉPUBLIQUE FÉDÉRALE DE L'ALLEMAGNE
Franz J. Friedrich
Projektleitung Energieforschung in der Kernforschungsanlage Julich GmbH

SAUDI ARABIA/ARABIE SAOUDITE
Ali Kettani
Islamic Foundation for Science, Technology and Development

SWEDEN/SUÈDE
Arne Boysen
Bengt Hidemark Gösta Danielson Arkitektkontor HB

S.E. Lundin
Swedish Council for Building Research

UNITED STATES/ÉTATS-UNIS
Anthony Gorski
Argonne National Laboratories

Imre Gyuk
U.S.A. Department of Energy

Landis Kannberg
Batelle Pacific Northwest Laboratories

Chin-Fu Tsang
Lawrence Berkeley Laboratory

TABLE OF CONTENTS/
TABLE DES MATIÈRES

A. AQUIFER/AQUIFÈRE

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
A1	Kannberg, L.D.	Aquifer Thermal Energy Storage in the United States Stockage de l'énergie thermique en milieu aquifère aux États-Unis	3
A2	Qvale, B.	The Danish Aquifer Thermal-Energy Storage Program Programme danois de stockage de l'énergie thermique dans les nappes aquifères	4
A3	Allen, R.	Impact of Water Quality on Aquifer Thermal Energy Storage Effet de la qualité de l'eau sur le stockage de l'énergie thermique en aquifère	5
A4	Arthurs, D.M. Chant, V.G. Morofsky, E.L.	Seasonal Heating and Cooling through Aquifer Energy Storage Chauffage et refroidissement saisonniers par stockage d'énergie en aquifère	7
A5	Blair, S.C.	Permeability of Ironton-Galesville Sandstone at Elevated Temperature and Pressure Perméabilité du grès de Ironton-Galesville à température et pression élevées	9
A6	Boisdet, A. Menjoz, A.	Project of Thermal Storage in Deep Aquifer (Sarcelles, France): Technical Data and Economic Analysis Projet de stockage thermique en aquifère profond (Sarcelles, France): Présentation technique et analyse économique	10
A7	Boldt, J.	Potential for Seasonal Storage of Industrial Surplus Heat Avenir du stockage saisonnier de la chaleur excédentaire des industries	12
A8	Brett, C.E. Schaetzle, W.J.	Experience with Chilled Water Storage in a Water Table Aquifer Expérience de stockage d'eau réfrigérée dans un aquifère	13

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
A9	Carotenuto, A. Fucci, F. La Fianza, G. Reale, F. Biggiero, V.	ATES - Experimental Project in Italy Projet expérimental de stockage thermique en aquifère en Italie	14
A10	Doughty, C. Tsang, C-F.	Investigation of the Vertical-Flow Aquifer Thermal Energy Storage Concept and Numerical Simulation of the Dorigny Field Experiment Étude du concept de stockage d'énergie thermique en aquifère avec circulation verticale et simulation numérique du champ d'expérimentation de Dorigny	15
A11	Eriksson, A. Johansson, S. Abyhammar, T.	Brunkeberg Aquifer Thermal Energy Storage in Central Stockholm Stockage d'énergie thermique en aquifère de Brunkeberg au centre de Stockholm	17
A12	Holm, T. Wilén, P.	Low Temperature Thermal Aquifer Storage Stockage thermique à basse température en aquifère	18
A13	Housse, B.A. Despois, J.	Prototype of Underground High-temperature Heat Storage in Thiverval-Grignon (France) Prototype de stockage souterrain de chaleur à Thiverval-Grignon (France)	20
A14	Hoyer, M.C. Walton, M. Kanivetsky, R. Holm, T.R.	Short-term Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) Test Cycles, St. Paul, Minnesota, U.S.A. Stockage d'énergie thermique à court terme en aquifère (ATES) cycles d'essai, St-Paul, Minnesota, États-Unis	22
A15	Hydén, H.	Aquifer Heat Storage Technology in Sweden Le stockage thermique en aquifère en suède	24
A16	Iris, P. Viennot, P. Ausseur, J.Y. Sauty, J.P.	Heat Storage and Heat Pumps on Aquifer - Two Case Studies Stockage de chaleur en aquifère et pompes à chaleur: deux études de cas	25
A17	Kangas, M.T. Lund, P.D. Laitinen, T.	Comparison of Long-term ATES Experiments to 3-D Computer Simulations Stockages thermiques en aquifère à long terme et simulations tridimensionnelles par modèles informatiques	27

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
A18	Lau, K.C. Crawford, A.M. Mirza, C.	Aquifer Thermal Energy Storage Systems With Two Aquifers Stockage d'énergie thermique dans deux aquifères	29
A19	Lemmeke, L. Sundlöf, B.	Project for Low-temperature Storage of Solar Heat in Klippan, Sweden Projet de stockage solaire à basse température à Klippan (Suède)	30
A20	Menjoz, A. Boisdet, A.	Project of Thermal Storage in Deep Aquifer (Sarcelles, France) Simulation of the Hydraulic and Thermal Behaviour of the System Projet de stockage thermique en aquifère profond (Sarcelles, France) Simulation du comportement hydraulique et thermique du système	31
A21	Mirza, C. Lau, K.C. Morofsky, E.L. Crawford, A.M.	ATES Experience with the Scarborough Field Trial Le stockage thermique en aquifère - le projet de Scarborough	33
A22	Palmer, C.D. Blowes, D.W. Frind, E.O.	Design and Implementation of a Heated Water Injection Experiment in an Unconsolidated Aquifer Conception et réalisation d'un essai d'injection d'eau chaude dans un aquifère non consolidé	34
A23	Shen, G-J. Tang, Y-b. Pang, B-Q.	Research on Energy Storage in the Underground Water and Its Quality in Changzhou City Recherche sur le stockage d'énergie dans l'eau souterraine et sur la qualité de cette eau dans la ville de Changzhou	35
A24	Snijders, A.L. van Woerkom, A.A.F.	The Feasibility of Seasonal Storage of Excess Heat for the District Heating System at Almere Faisabilité du stockage saisonnier de la chaleur excédentaire de la centrale de chauffage urbain d'Almere	37

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
A25	Sorensen, S.N. Olsen, H. Qvale, B.	Groundwater Heat Pumps in Combination with Low-temperature "Natural" Heat Sources. Economical and Technical Aspects Pompes à chaleur à eau souterraine utilisant des sources de chaleur "naturelles" à basse température. Aspects financiers et techniques	39
A26	Sun, Y-F. Su, H-y.	Economical Effect of the Introduction of Aquifer Cold Preservation for Air-Conditioning Temperature Lowering of Shanghai HongQiao Airport Effet économique de la conservation du froid en aquifère pour le conditionnement de l'air et l'abaissement de la température à l'aéroport HongQiao de Shanghai	40
A27	Tsang, C-F. Wilt, M.J.	Monitoring of Hot Water Plume Movements in an Aquifer with Borehole/Surface Resistivity Measurements Enregistrement des mouvements du panache d'eau chaude dans une nappe aquifère par mesure de la résistivité en surface et dans des trous de forage	41
A28	Vail, L.W. Kannberg, L.D. Kincaid, C.T.	A Computer Code for Analyzing the Performance of Aquifer Thermal Energy Storage Systems Un code informatique pour analyser le rendement des installations de stockage d'énergie thermique dans les aquifères	43
A29	van der Bruggen, R.J.A. Snijders, A.L.	Heating of an Office Building Using Solar Energy in Combination with a Heat Pump and Seasonal Heat Storage Chauffage d'un édifice à bureaux par système solaire, pompe à chaleur et stockage de chaleur saisonnier	45
A30	Zhao, B. Zhao, R.	Analysis of Air-Conditioning System with Chilled Water Storage in Aquifer Analyse d'une installation de conditionnement d'air avec stockage d'eau refroidie en aquifère	47

B. DUCT/CONDUITS

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
B1	Boileau, Y. Ferrande, R. Marie, J-P.	Underground Heat Storage in France - Present Stage of Development and Future Prospects Les filières de stockage thermique souterrain en France-État actuel de développement et perspectives	51
B2	Catan, M. Dalenback, J. van Hattem, D.	Review and Findings of the Second EC-IEA Workshop on Solar Assisted Heatpump Systems with Ground Coupled Storage Revue et conclusions du deuxième atelier CE-AIE sur les pompes à chaleur faisant appel à l'énergie solaire et au stockage souterrain	52
B3	Lundin, S-E.	Thermal Energy Storage Programme in Sweden Programme suédois de stockage d'énergie thermique	53
B4	Andersson, S.	Ground Heat Storage Technology in Sweden Stockage thermique souterrain en Suède	55
B5	Andersson, S. Eriksson, A. Schmied, H.	Soil Air as a Heat Source for Domestic Heating by Heat Pumps Utilisation de l'air du sous-sol comme source de chaleur pour les pompes à chaleur de chauffage résidentiel	56
B6	Bénet, J.C. Saix, C. Jouanna, P.	Experimental Study of Transfers of Mass and Energy Above a Heat Storage in Unsaturated Soil Étude expérimentale des transferts de masse et d'énergie au-dessus d'un stockage de chaleur en sol non saturé	57
B7	Breger, D.S. Michaels, A.I.	An Evaluation of Solar Heating Systems with Seasonal Storage in New England: Systems Using Duct Storage in Rock and Heat Pump Évaluation des installations de chauffage solaire à stockage saisonnier en Nouvelle-Angleterre: installations utilisant le stockage par conduits dans le roc et les pompes à chaleur	59

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
B8	Claesson, J. Eskilson, P.	Thermal Analysis of Heat Extraction Boreholes Analyse théorique des forages d'extraction de chaleur	61
B9	Crawford, A. Lau, K.C. Radhakrishna, H.S.	The Effect of Cyclic Thermal Loading on Near-Surface Energy Storage Facilities L'effet des cycles thermiques sur les installations de stockage d'énergie peu profondes	62
B10	Hellström, G. Palmgren, C. Rydell, B.	Heat Storage in Clay - A Technical and Economical Evaluation of Vertical Earth Heat Exchangers Stockage de la chaleur dans l'argile-Une évaluation économique et technique des échangeurs de chaleur verticaux souterrains	63
B11	Hellström, G.	Thermal Performance of Ground Heat Exchangers. Analytical Formulas Formules analytiques du rendement thermique d'échangeurs de chaleur souterrains	64
B12	Hydén, H. Kellner, J.	The Suncourt Project Le projet Suncout	66
B13	Leroy, G.	Transient Response of an In-ground Vertical Cylindrical Heat Exchanger - Thermal Characterization of the Soil Réponse transitoire d'un échangeur cylindrique vertical dans le sol caractérisation - thermique du terrain	67
B14	Margen, P.	The Economics of Different Types of Energy Storage for Large and Medium Space Heating Systems Rentabilité économique de différents types de stockages d'énergie pour installations de chauffage des locaux de grande et moyenne puissance	68
B15	Nordell, B. Sehlberg, T.	Economic Aspects of Borehole Heat Stores in Sweden Aspects financiers du stockage dans un forage en Suède	70

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
B16	Nordell, B. Sehlberg, T. Abyhammar, T.	System Design for Borehole Heat Stores, General Aspects and Operational Experience from the Store at Luleä, Sweden Conception d'installations de stockage thermique dans des forages, aspects généraux et expérience d'exploitation du stockage de Luleä (Suède)	71
B17	Rhen, I. Sundberg, J.	Design of Shallow Horizontal Pipe Systems Used as a Heat Source for Heat Pumps Conception des réseaux de tuyauterie horizontaux peu profonds utilisés comme source froide pour les pompes à chaleur	72
B18	Saix, C. Jouanna P.	Capacity of Saturated or Unsaturated Soil to Restore Calories by Gelation Aptitudes d'un sol, saturé ou non saturé, à restituer des calories par gelification	74
B19	Sundberg, J.	Thermal Conductivity of Rock and Soil Conductivité thermique des roches et des sols	76
B20	Tollin, J.	Heat Pump with a Hard Rock Well Equipped for Thermal Recharging Pompe à chaleur avec puits forés dans la roche dure équipée pour le rechargement thermique	77
B21	Wijsman, A.J.Th.M. van Meurs, G.A.M.	Validation of "Duct-Store" Models with Experimental Data from the Groningen Project Validation des modèles "Duct-Store" avec données expérimentales du projet de Groningen	79
B22	Wilén, P. Rhen, I. Bäckström, B.	Development of Heat Storage Systems with Vertical Pipes in Earth and Rock Développement d'installations de stockage thermique à tubes verticaux dans le sol et le roc	80

C. ICE/GLACE

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
C1	Buies, S.	The "Fabrikaglace" Process to Make and Store Natural Ice Le processus "Fabrikaglace" pour fabriquer et stocker de la glace naturelle	85
C2	Francis, C.E.	An Annual Storage Ice System for Summer Cooling Installation de stockage annuel du froid sous forme de glace pour la climatisation en été	87
C3	Francis, C.E. Tamblyn, R.T.	Seasonal Ice Storage Stockage saisonnier de glace	89
C4	Granström, B. Kjaerboe, P.	Ice Water Basins Used as a Latent Heatsink in the Dairy Industry Utilisation de la chaleur latente d'un bassin d'eau gelée dans l'industrie latière	90
C5	Marquette, C.J.	Ice Storage Systems that Cost Less Than Conventional Systems -- A Breakthrough for Building Owners Installations de stockage de glace moins coûteuses que des installations classiques -- une découverte intéressante pour les propriétaires de bâtiments	91
C6	Morofsky, E.L.	Cooling With Ice -- Canadian Progress Refroidissement par la glace -- progrès réalisés au Canada	93
C7	Vigneault, C. Lemieux, M.	Ice Production Using Ambient Winter Temperatures Production de glace à l'aide des températures ambiantes hivernales	94
C8	Vigneault, C. Gallichand, J. Jacob, G.	Precooling Vegetables Using a Block of Ice Produced by Winter Coolness Prérefrigération des légumes au moyen d'un bloc de glace obtenu en utilisant le froid hivernal	95

D. SYSTEMS/SYSTÈMES

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
D1	Bankston, C.A.	Technical and Economic Feasibility of Central Solar Heating Plants With Seasonal Storage Faisabilité technique et économique des centrales de chauffage solaire avec stockage saisonnier	99
D2	Boysen, A.	Central Solar Heating Plants With Seasonal Storage - An International Feasibility Study Installations de chauffage central solaire avec stockage saisonnier - Étude internationale de faisabilité	100
D3	Sabel, H.	Seasonal Storage of Heat for District Heating in Sweden Stockage saisonnier de chaleur servant au chauffage urbain en Suède	101
D4	van Mourik, G.J.	Heat Storage R & D in The Netherlands Recherche et développement portant sur le stockage de chaleur aux Pays-Bas	103
D5	Akiya, T. Owa, M. Nakaiwa, M. Kawasaki, S. Ishibashi, Y. Ando, Y.	Study of Cool Storage Using Refrigerant Gas Hydrate Étude sur le stockage de froid avec un hydrage gazeux comme réfrigérant	105
D6	Allen, G. Kani, M.	Integrated Thermal Storage in Energy Systems for Canadian Low Energy Houses Stockage thermique intégré dans les maisons canadiennes à haut rendement énergétique	106
D7	Benson, D.K. Christensen, C.B. Burrows, R.W. Shinton, Y.D.	New Phase Change Thermal Energy Storage Materials for Buildings Nouveaux matériaux de stockage de l'énergie thermique par changement de phase pour les bâtiments	108
D8	Brunström, C. Larsson, M. Holst, P. Zinko, H. Hillström, C-G.	The Lyckebo Rock Cavern Seasonal Storage Plant Experience of One Year of Operation Centre de stockage saisonnier de la caverne de Lyckebo: Un an d'exploitation	110

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
D9	Bugaj, A.H. Hahne, E.	Analysis of a Thermochemical Energy Storage System with Liquid Absorbents Analyse d'un sysème de stockage d'énergie thermo-chimique dans des liquides absorbants	112
D10	Charlier, M. Wauters, P.	Model of a Heating Installation Consisting of Solar Collectors, Storage Tank and Heat Pump Modélisation d'une installation de chauffage comportant capteurs solaires, cuve de stockage et thermopompe	114
D11	Dalenbäck, J-O.	A Solar Heating Plant With Heat Pump and Seasonal Storage - System Design Influence on Thermal Performance and Economy Centrale de chauffage solaire à stockage saisonnier munie d'une pompe à chaleur - influence du type de système sur la performance thermique et économique	116
D12	Dytczak, M. Turlejski, S.	Analysis and Theoretical Design of CSHPSS in Poland Analyse et conception d'une centrale de chauffage à l'énergie solaire avec stockage saisonnier en Pologne	118
D13	Franck, P-A. Berntsson, T.	Optimization of a Combined Heat Pump/Storage System with Solar or Convective Heat Collectors Optimisation d'une installation mixte pompe à chaleur/stockage avec capteurs solaires ou capteurs de chaleur à convection	119
D14	Hadorn, J.C. Chuard, P. Chuard, D.	The Vaulruz Project - Experimental Results Le Projet Vaulruz - résultats d'essai	120
D15	Hausz, W.	Thermal Energy Storage in the Energy Ecosystem Stockage d'énergie thermique dans l'écosystème énergétique	121
D16	Ismail, K.A.R. Alves, C.L.F.	Latent Heat Storage in Finned Tubes Stockage de la chaleur latente dans des tubes à ailettes	123

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
D17	Krischel, D.	Comparison of Concepts for Central Solar Heating Plants with Seasonal Storage Étude comparative de différentes conceptions de centrales de chauffage à l'énergie solaire avec stockage saisonnier	125
D18	Lenoir, Y. Sneed, C.	Opensol: Software for the Optimization of Sizing and Control of Complex Heating Systems with Long-Term Heat Storage Opensol: Logiciel d'optimisation du dimensionnement et de la commande des systèmes de chauffage complexes comprenant un stockage de chaleur à long terme	127
D19	Monaghan, P.F. O'Donnell, G.N.	Storage of Off-peak Electrical Energy in Building Floors with Particular Reference to Resistance Heating and Heat Pump Systems Stockage d'énergie électrique hors pointe dans les planchers en particulier dans le cas de chauffage par résistances ou par pompe à chaleur	129
D20	Nordell, B.	The Borehole Heat Store at Luleã, Sweden Le stockage dans un forage à Luleä (Suède)	131
D21	Ostensson, B.	A HVAC System Based on Seasonal Heat Storage Installation de chauffage, ventilation et conditionnement d'air avec stockage thermique saisonnier	132
D22	Restuccia, G. Cacciola, G. Recupero, V. Di Leonardo, R.	Energy Storage by Adsorption of Water on Zeolite for Building Heating Stockage d'énergie par adsorption d'eau dans la zéolite pour le chauffage des bâtiments	133
D23	Sauty, J.P. Ausseur, J.Y.	Présentation of a Software Package for Automated Evaluation of Soil Heat Storage Projects Presentation d'un logiciel pour l'évaluation automatisée des projets de stockage de chaleur dans le sol	135

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
D24	Van Loey, J. Van de Perre, R. Leskens, E.	Simulation and Experiments in Moderate Climate Conditions on the Behaviour of Greenhouses, Fitted Out with a Short-term Rock-bed Thermal Storage Simulation et expériences en climat tempéré du rendement de serres dotés d'un stockage thermique à court terme par lit de galets	137
D25	Vasselin, P.H.	Optimal Management of Heat Storage for a Heating and Cooling Plant: Equations and Example of Solution Gestion optimale de stocks de chaleur couples à une centrale de chauffage et climatisation: Mise en équation et exemple de solution	138
D26	Weik, H. Plagge, J.	A New Interseasonal Storage Concept for Solar Heat Applications in Private Buildings in Moderate Climates Nouveau concept de stockage intersaisonnier de la chaleur solaire dans les bâtiments privés en climat tempéré	140
D27	Wijsman, A.J.Th.M.	The Groningen Project: 96 Solar Houses with Seasonal Heat Storage in the Soil Le Projet Groningen: 96 maisons solaires avec stockage de chaleur saisonnier dans le sol	142

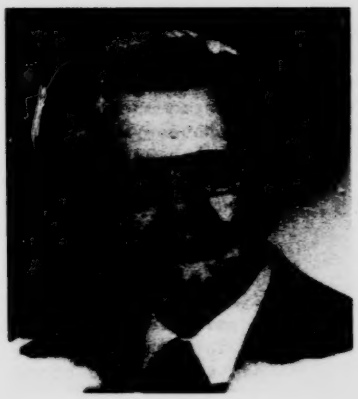
E. WATER/EAU

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
E1	Gustafson, G.	Heat Storage in Caverns, Tanks and Pits: An Overview of Swedish Experiences Stockage de chaleur dans les cavernes, les réservoirs et les puits: Survol de l'expérience suédoise	147
E2	Burgeff, D.C. Wildin, M.W.	An Experimental Study of the Effects of an Inlet Diffuser on Performance of Horizontal Cylindrical Hot Water Storage Tank Étude expérimentale des effets d'un diffuseur d'admission sur le rendement d'un réservoir cylindrique horizontal de stockage d'eau chaude	149
E3	Cayron, L. Pauzin, S.	Experimental Study of a Storage Reservoir Simulation Model Étude expérimentale d'une maquette simulant un réservoir de stockage	151
E4	Cohen, R.R. Tanton, D.M. Probert, S.D. Nevrala, D.J.	Synergism of a Thermal Energy Store with a Central-Heating Boiler Combinaison d'un stockage thermique avec une chaudière de chauffage central	153
E5	de la Morinière, O.	Designing the Most Cost-Effective Thermal Storage for Cooling in New Buildings Climatisation: Quel stockage?	155
E6	Hansen, K.K. Hansen, P.N. Ussing, V.	Stratified Operation of a 500 m3 Test Pit Exploitation de la stratification d'un puits d'essai de 500 m^3	157
E7	Hansen, P.N.	General Theory of Heat and Cold Storage Théorie générale du stockage de la chaleur et du froid	159
E8	Kjaerboe, P.	Heat Storage and Extraction from the Abandonned Waterfilled Mines in Norberg, Sweden: Idea and Experiences Stockage et extraction de chaleur dans les mines abandonnées remplies d'eau de Norberg en Suède: Idée et expériences	160

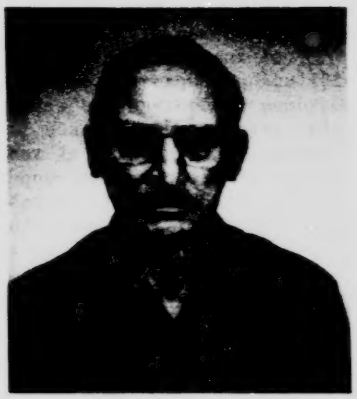
Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
E9	Martna, J.	The Avesta Research Plant for Hot Water Storage - Summary of Research 1982-1985 Stockage d'eau chaude à Avesta (Suède) - résumé des recherches effectuées de 1982 à 1985	161
E10	Rehbinder, G.	Strains in the Rock Around an Unlined Hot Water Storage Cavern Déformations dans le roc autour des cavités rocheuses de stockage d'eau chaude sans chemisage	163
E11	Rosen, M.A. Hooper, F.C.	A Concise Method for Evaluating the Heat Loss from Bermed Heat Storage Tanks Une méthode concise d'évaluation des pertes de chaleur de réservoirs de stockage thermique aménagés en talvo	165
E12	Rosenblad, G.	Quality Loss from Seasonal Storing of Heat in Rock, Magnitude and Evaluation Perte de qualité d'un stockage saisonnier de chaleur dans la roche, ordre de grandeur et évaluation	167
E13	Svensson, T.	Experience from a Lake Heat System at Ö. Grevie, Sweden Expérience d'un système thermique dans un lac à Ö. Grevie en Suède	169
E14	Tamblyn, R.T.	Diurnal Thermal Storage Stockage thermique diurne	171
E15	Truman, C.R. Roybal, L.G. Wildin, M.W.	A Finite Difference Model for Stratified Chilled Water Thermal Storage Tanks Modèle de calcul des différences finies pour réservoirs stratifiés de stockage thermique d'eau refroidie	172
E16	Vasseur, B.	Experience of Heat Loss From and Temperature Distribution in a Water-Filled Density-Stratified Rock Cavern Répartition de la température et pertes thermiques dans un stockage d'eau en cavité rocheuse	174

Paper/ Communication	Author/Auteur	Title/Titre	Page
E17	Voigt, B. Ruhnau, R.	Long Term Heat Accumulator in Berlin (West Germany) - Storage Construction, First Results and Further Developments Stockage thermique à long terme à Berlin (Allemagne de l'ouest) - Construction de l'installation, premiers résultats et réalisations	175

AQUIFER/
NAPPES AQUIFERES



Frank Hooper, B.A.Sc., D.I.C., F.E.I.C., P.Eng.
Hooper and Angus Associates Ltd.
Toronto, Canada



Jean Goguel, Docteur de Sciences,
Ingenieur General des Mines en retraite
B.R.G.M.
Paris, France

AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE IN THE UNITED STATES

STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN MILIEU AQUIFÈRE AUX ÉTATS-UNIS

Landis D. Kannberg
Pacific Northwest Laboratory
Richland, U.S.A.

The United States Department of Energy (DOE) has funded investigation of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) since 1975. The scope of the ATES investigation has encompassed numerical modeling, field testing, economic analyses, and evaluation of institutional issues. ATES has received the bulk of the attention because of its widespread potential in the U.S.

U.S. efforts are now concentrated on a high temperature (up to 150°C) ATES field test on the St. Paul campus of the University of Minnesota. Four short-term test cycles and the first of two long-term test cycles have been completed at this site.

Utilization of chill ATES to meet summer air conditioning demands has been monitored at two operating sites in Tuscaloosa, Alabama. The systems utilize a cooling tower to directly chill groundwater pumped from a water table aquifer for storage in the same aquifer. The first of the two systems has exhibited relatively poor performance. More comprehensive monitoring has recently been undertaken at another site.

Le Département de l'Énergie des États-Unis finance depuis 1975 des études sur le stockage de l'énergie thermique en aquifère (ATES). Ces études ont englobé de nombreuses modélisations et analyses économiques, plusieurs essais sur le terrain ainsi qu'une évaluation des questions institutionnelles. Le potentiel généralisé du ATES aux États-Unis justifie d'ailleurs l'attention énorme qu'on lui accorde.

À l'heure actuelle, les travaux aux États-Unis portent sur un essai ATES à haute température (jusqu'à 150 °C) sur le campus St. Paul de l'Université du Minnesota. Jusqu'à maintenant, on a terminé quatre cycles d'essai de courte durée et le premier de deux cycles de longue durée.

À deux sites à Tuscaloosa en Alabama, on surveille l'exploitation d'un système de stockage d'énergie thermique refroidie visant à répondre à la demande de climatisation en été. Le système fonctionne comme suit : on pompe directement dans une tour de refroidissement l'eau souterraine d'une nappe phréatique qui, une fois refroidie, est retournée dans le milieu de stockage. Le premier des deux systèmes a fait bien piètre figure, mais on vient de mettre sur pied un projet de contrôle plus exhaustif à un autre endroit.

THE DANISH AQUIFER THERMAL-ENERGY STORAGE PROGRAM

PROGRAMME DANOIS DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE DANS LES NAPPES AQUIFÈRES

Bjorn Qvale
Technical University of Denmark
Lyngby, Denmark

A short survey is given of the projects that constitute the Danish Aquifer Thermal-Energy Storage program, together with a short list of references.

On présente un court relevé des projets composant le programme danois de stockage de l'énergie thermique dans les nappes aquifères, ainsi qu'une brève bibliographie.

IMPACT OF WATER QUALITY ON AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE

EFFET DE LA QUALITÉ DE L'EAU SUR LE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE EN AQUIFÈRE

Robert D. Allen
Pacific Northwest Laboratory
Richland, U.S.A.

Ground-water quality and controlling geologic characteristics may affect the feasibility of aquifer thermal energy storage (ATES) system development in any hydrologic region. This study, conducted by Pacific Northwest Laboratory, sought to determine the relationships between ground-water quality parameters and the regional potential for ATES system development.

Information was collected from available literature to identify chemical and physical mechanisms that could adversely affect an ATES system. Appropriate beneficiation techniques to counter these potential geochemical and lithologic problems were also identified through the literature search. Regional hydrology summaries and other sources were used in reviewing aquifers of 19 drainage regions in the United States to determine generic geochemical characteristics for analysis. Numerical modeling techniques were used to perform geochemical analyses of water qualities from 67 selected aquifers. Candidate water resource regions were then identified for exploration and potential development of ATES.

This study identified six principal mechanisms by which ATES reservoir permeability may be impaired: 1) particulate plugging, 2) chemical precipitation, 3) liquid-solid reactions, 4) formation disaggregation, 5) oxidation reactions, and 6) biological activity. Specific proven countermeasures to reduce or eliminate these effects were found.

The chemistry of any ground-water sample was found to result from solution, precipitation, and fluid mixing interactions with minerals and subsurface waters. Water analyses

La qualité de l'eau souterraine et les caractéristiques géologiques peuvent modifier la faisabilité d'un projet de stockage de l'énergie thermique en aquifère (ATES) d'une région hydrologique particulière. Cette étude, effectuée par Pacific Northwest Laboratory, visait à déterminer les relations qui existent entre les paramètres relatifs à la qualité de l'eau souterraine et la possibilité de créer une installation ATES régionale.

De nombreux renseignements ont été recueillis dans les documents techniques portant sur le sujet afin de déterminer les mécanismes physiques et chimiques qui pourraient nuire à un projet ATES. Les techniques correctives pour éviter ces problèmes géochimiques ou lithologiques ont été identifiées dans les documents techniques existants. Les résumés hydrologiques régionaux et d'autres documents ont été utilisés pour étudier les caractéristiques géochimiques génériques des aquifères de 19 régions de drainage aux Etats-Unis en vue de les analyser. Diverses méthodes techniques de modélisation numérique ont été employées pour effectuer des études géochimiques de la qualité de l'eau dans 67 aquifères choisis. Les régions dont l'eau est appropriée sont alors identifiées à des fins d'exploration et du développement possible d'un ATES.

Cette étude décrit les six principaux mécanismes qui peuvent nuire à la perméabilité d'un réservoir ATES: 1) bouchon de particules, 2) précipitation chimique, 3) réactions liquide-solide, 4) désagrégation, 5) réactions d'oxydation, et 6) activité biologique. Des méthodes efficaces ont été trouvées pour réduire ou éliminer ces effets.

Les composantes chimiques de tout échantillon d'eau souterraine sont le résultat de la composition de la solution, des précipitations et des interactions de mélange

modeled with the MINTEQ computer code identified three potential problem reactions: 1) precipitation of calcium carbonate at elevated water temperature; 2) solution of silica at elevated temperature, followed by its precipitation at lowered temperature; and oxidation and precipitation of iron compounds.

Study findings suggest that aquifers composed of quartz sands and sandstones are most promising for low temperature and chilled water storage. Quartzose rocks are believed to be promising for high temperature storage, providing that silica dissolution and precipitation within the temperature regime of the cycle is not significant.

Of the U.S. hydrologic regions reviewed, 10 were identified as having the characteristics necessary for ATES development: 1) Mid-Atlantic, 2) South-Atlantic Gulf, 3) Ohio, 4) Upper Mississippi, 5) Lower Mississippi, 6) Souris-Red-Rainy, 7) Missouri Basin, 8) Arkansas-White-Red, 9) Texas Gulf, and 10) California.

du fluide avec des minéraux et des eaux de surface. L'analyse de l'eau au moyen du programme MINTEQ a révélé trois problèmes possibles: 1) précipitation du carbonate de calcium aux températures élevées; 2) solution de silice à température élevée, suivi par sa précipitation à basse température; et 3) oxydation et précipitation des composés du fer.

Les résultats des études montrent que les aquifères composés de sable à base de quartz et de grès sont plus avantageux pour le stockage de l'eau réfrigérée ou à basse température. Les roches à base de quartz semblent plus adaptées au stockage à haute température à condition que la dissolution de la silice et la précipitation dans la gamme de températures du cycle ne soit pas importante.

Parmi les régions hydrologiques des USA étudiées, 10 ont été retenues comme ayant des caractéristiques appropriées à la mise en oeuvre d'un projet ATES. 1) Centre-Atlantique, 2) Golfe de l'Atlantique Sud, 3) Ohio, 4) Bassin supérieur du Mississipi, 5) Bassin inférieur du Mississipi, 6) Souris-Red-Rainy, 7) Bassin du Missouri, 8) Arkansas-White-Red, 9) Golfe du Texas, et 10) Californie.

SEASONAL HEATING AND COOLING THROUGH AQUIFER ENERGY STORAGE

CHAUFFAGE ET REFROIDISSEMENT SAISONNIERS PAR STOCKAGE D'ÉNERGIE EN AQUIFÈRE

D.M. Arthurs, V.G. Chant, James F. Hickling Consultants Ltd.
E.L. Morofsky, Public Works Canada
Ottawa, Canada

The Scarborough Government of Canada Building has been designed for both energy conservation and research into effective use of the latest energy conservation technology.

One of the alternate technologies which is being investigated is aquifer energy storage. Cold or hot water is stored underground in a permeable layer of sand and later retrieved to supply the building heating or cooling load. Cold water can be obtained from cooling towers during the winter. Hot water can be obtained by recovering waste heat from summer chiller operation.

The requirements for space cooling and heating were determined to be 4670 MWh and 1890 MWh respectively. There was a simultaneous heating and cooling demand due to the imbalance between heat gain at the building core and heat loss at the perimeter.

Operation of the heating and cooling system was modeled on a monthly basis using four different strategies. Each strategy utilized different combinations of the following available components: chiller, cooling tower, aquifer, boiler. The strategies were evaluated based on both the energy input and annualized capital cost.

It was found that storage of cooling energy made more sense than storage of heating energy for this application. This was because of the substantially greater cooling load and the relatively smaller thermal losses associated with cooling energy storage. The bulk of the heating could be accomplished by heat transfer within the building.

L'édifice du gouvernement fédéral à Scarborough a été conçu pour économiser l'énergie et servir de bâtiment expérimental aux technologies nouvelles en matière d'économie d'énergie.

Des recherches sont actuellement entreprises sur le stockage d'énergie en aquifère. L'eau chaude ou froide stockée dans une couche de sable perméable est utilisée ultérieurement pour le chauffage ou le refroidissement du bâtiment. L'eau froide peut provenir d'une tour de refroidissement fonctionnant l'hiver. L'eau chaude peut provenir de la récupération de la chaleur dégagée par le condenseur en été.

Les énérgies nécessaires calculées pour le refroidissement et le chauffage sont de 4 670 MWh et 1 890 MWh respectivement. Il existait donc simultanément une demande de chauffage et de refroidissement en raison du déséquilibre entre les gains de chaleur au centre du bâtiment et les pertes de chaleur en périphérie.

Le fonctionnement des installations de chauffage et de refroidissement a été modélisé sur une base mensuelle avec quatre stratégies différentes. Chaque stratégie faisait appel à différentes combinaisons d'éléments (condenseur, tour de refroidissement, aquifère, chaudière à eau). Les différentes solutions ont été évaluées sur la base des apports d'énergie et du coût d'investissement annuel.

On a constaté que le stockage de l'énergie de refroidissement était plus avantageux que celui de l'énergie de chauffage pour ce type d'application. Ceci étant dû au fait que la charge de refroidissement était beaucoup plus importante et que les pertes thermiques étaient plus faibles pour le refroidissement que pour le chauffage. La pointe de la demande de chauffage peut être satisfaite par un transfert de chaleur à l'intérieur même du bâtiment.

The energy input necessary to meet the heating and cooling demand of the building was minimized through utilization of the aquifer for seasonal storage. However, the capital cost of the aquifer made its use less economical overall than an alternative strategy in this particular application.

L'apport d'énergie nécessaire pour satisfaire à la demande de chauffage et de refroidissement du bâtiment a été réduit au minimum en utilisant le stockage saisonnier en aquifère. Toutefois, le coût d'investissement pour l'utilisation d'un aquifère est moins économique que d'autres solutions pour cette application particulière.

PERMEABILITY OF IRONTON-GALESVILLE SANDSTONE AT ELEVATED TEMPERATURE AND PRESSURE

PERMÉABILITÉ DU GRÈS DE IRONTON-GALESVILLE À TEMPÉRATURE ET PRESSION ÉLEVÉES

S.C. Blair
Lawrence Livermore National Laboratory
Livermore, U.S.A.

A series of permeability tests have been conducted at elevated temperature and pressure on samples of Ironton-Galesville sandstone. These tests were in support of the Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) site in St. Paul, Minnesota, operated by the Department of Energy. Laboratory tests at conditions representative of those imposed by an ATES facility on storage aquifers are important, as they can assist in identifying harmful processes that may be occurring in an aquifer. Tests reported in this paper monitored permeability of core samples of two different fluids with time at temperatures of 25, 90, 125 and 150°C. These tests represent a continuation of research activities reported previously at the international conference titled Subsurface and Heat Storage in Theory and Practice held in Stockholm, Sweden, June 6-8, 1983.

Results indicate that on the time scale of these experiments (days) flow of heated groundwater, at flow rates equivalent to those in the near-well region, caused extensive dissolution of cementing agents and loss of mechanical strength in the sandstone cores. Data also indicate that during heating of the core, permeability is reduced by liberation of fine particles.

These results indicate that operation of the ATES facility at St. Paul may be changing the fabric of the host aquifer; however, results of short-term storage tests indicate there has been no significant impact on the hydrologic performance of the aquifer.

Une série d'essais de perméabilité ont été effectués sur des échantillons de grès de Ironton-Galesville à des pressions et des températures élevées. Ces essais font partie du programme de stockage de l'énergie thermique (ATES) en aquifère du ministère de l'Energie à Saint-Paul (Minnesota). Les essais de laboratoire dans des conditions proches de celles imposées par un tel programme sont importants, car ils peuvent servir à identifier les phénomènes nuisibles qui peuvent se produire dans un aquifère. Les résultats des essais rapportés dans cette note portent sur la perméabilité d'échantillons à deux fluides différents en fonction du temps, à des températures de 25, 90, 125 et 150 °C. Ces essais viennent compléter les recherches rapportées à la conférence internationale intitulée "Subsurface and Heat Storage in Theory and Practice" et qui s'est tenue à Stockholm (Suède) du 6 au 8 juin 1983.

Les résultats indiquent qu'à l'échelle de la durée (nombre de jours) de ces écoulements expérimentaux d'eau chaude souterraine et à des débits équivalents à ceux à proximité des puits, une forte dilution des agents de cimentation s'est produite ainsi qu'une perte de résistance mécanique dans les échantillons de grès. Les résultats indiquent également que pendant le réchauffage des échantillons de grès, la perméabilité est réduite par libération de particules fines.

Ces résultats montrent donc que le fonctionnement d'un stockage ATES à Saint-Paul peut modifier la constitution d'un aquifère; toutefois, les résultats des essais de stockage à court terme indiquent qu'il n'y a pas eu d'effet significatif sur le rendement hydrologique de l'aquifère.

PROJECT OF THERMAL STORAGE IN DEEP AQUIFER (SARCELLES, FRANCE): TECHNICAL DATA AND ECONOMIC ANALYSIS

PROJET DE STOCKAGE THERMIQUE EN AQUIFÈRE PROFOND (SARCELLES, FRANCE): PRÉSENTATION TECHNIQUE ET ANALYSE ÉCONOMIQUE

A. Boisdet & A. Menjoz
Institut Mixte de Recherches Géothermiques
(BRGM/AFME)
Orléans, France

The considerable energy potential associated with off-season thermal storage both in France and in the rest of the world justifies sustained research effort. After several years of research on medium-temperature storage, a demonstration project has been set up in Sarcelles, north of Paris.

Most economic activities are concerned with problems caused by the lag between energy availability and need; however, certain sectors appear more conducive to economic development.

In order to achieve a perfect balance between energy needs and resources, the possibility of complete utilization must exist; this in turn requires that the resource be either unlimited and without inertia or that a perfect and permanent connection exist between needs and resources. In most cases, these two conditions are not satisfied, or, if they seem to be so at one level of an energy system, at a higher level they are not.

It is this lack of balance that is responsible for the considerable energy losses observable on the scale of an entire country, such as France. To industrial thermal losses (30% of the total energy consumption) must be added the thermal losses of power plants. With the development of the nuclear program, power surpluses are expected in summer. In the long run, the enormous resource represented by solar radiation could be developed as a source of heat for buildings through off-season storage systems.

Of all the possible systems, aquifer thermal storage is probably the most promising, and an industrial storage experiment at medium depths will be carried out at Sarcelles, in the Paris region.

L'enjeu énergétique considérable du stockage thermique intersaisonnier en France, et dans le monde, justifie un effort de recherche soutenu. Plusieurs années de recherche dans le domaine du stockage à moyenne température ont permis de déboucher sur le montage d'une opération de démonstration à Sarcelles, au nord de Paris.

La plupart des activités économiques sont concernées par les problèmes de déphasage énergétique, toutefois, certains secteurs paraissent plus propices à des réalisations économiquement rentables.

L'adéquation parfaite entre les besoins et les ressources énergétiques nécessite une possibilité de mobilisation absolue ceci impose soit que la ressource soit infinie et sans inertie, soit un couplage parfait et fixe entre les besoins et les ressources. Dans la majorité des cas ces deux conditions ne sont pas remplies ou si elles paraîssent l'être à un niveau d'un système énergétique, elles ne le sont plus au niveau supérieur.

C'est cette inadéquation qui est responsable de pertes énergétiques considérables que l'on peut constater à l'échelle d'une société comme la société française. Aux pertes thermiques de l'industrie (30 % de l'énergie totale consommée), il faut ajouter les pertes thermiques des centrales électriques. Avec le développement du programme nucléaire des excédents estivaux de puissance sont attendus. À plus longue échéance, l'énorme gisement que représente le rayonnement solaire pourrait être valorisé pour le chauffage des locaux grâce à des systèmes de stockages intersaisonniers.

Parmi tous les systèmes possibles le stockage thermique en aquifère est probablement le plus prometteur et une expérience de stockage à moyenne profondeur de caractère industriel sera tentée à Sarcelles, dans la région parisienne.

Recent aquifer storage experiments in France (Bonneaud, Camperget) and abroad (Mobile, St Paul in the USA) have shown that a geothermal operation which permits the storage of heat at a temperature that is not too high (below 90°C) would very likely be economically viable.

It was with this in mind that the Institut Mixte de Recherches Géothermiques searched for a suitable site on which to set up a full-scale operation.

The site chosen was at Sarcelles. The heat to be stored will be supplied by a household garbage incineration plant. The plant is equipped with an energy recovery system that is connected to the urban heating system of Sarcelles. Because of the thermal power recoverable from the flue-gas from the incineration plant, heat surpluses exist which are dissipated at great cost using space coolers. It is this heat that is to be stored. The storage will be connected to a segment of the heating system that consists of approximately 1,000 dwellings, heated at a sufficiently low temperature (solar panels) that a good rate of return may be expected on stored heat (from 65 to 70%, according to simplified theoretical calculations).

The heat storage system consists of paired wells in the Neocomian stage, a clay-sand aquifer located at a depth of 900 metres. The maximum temperature of the stored water will be below 50°C, and the maximum flow will be 150m^3/h, which represents a maximum immediate storage retrieval of 9 MW.

The project as a whole was the subject of in-depth studies from which were drawn up a series of precise technical specifications.

The project, which will be operational by 1986, is being financed jointly be l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, the European Economic Community and an economic interest group made up of the B.R.G.M. and the GÉOCHALEUR firm.

Des expériences de stockage en aquifère, récentes en France, (Bonneaud, Camperget) ou à l'étranger (Mobile, St Paul aux USA), il ressort qu'une opération, conçue comme une opération de géothermie, et permettant de stocker de la chaleur à un niveau qui ne soit pas trop élevé (inférieur à 90 °C) aurait toutes les chances d'être un succès économique.

C'est dans cet ordre d'idée que l'Institut Mixte de Recherches Géothermiques a recherché un site pour réaliser une opération en vraie grandeur.

Le site de Sarcelles a été retenu. La chaleur à stocker sera fournie par une usine d'incinération des ordures ménagères. Celle-ci est dotée d'un système de récupération d'énergie raccordé au chauffage urbain de Sarcelles. En raison de la puissance thermique récupérable sur les fumées de l'usine d'incinération des excédents de chaleur existent qui sont dissipés onéreusement grâce à des aéroréfrigérants. C'est cette chaleur qui serait stockée. Le stockage sera raccordé à une ramification du réseau de chaleur comportant 1 000 logements environ, chauffés à suffisamment basse température (panneaux de sol) pour espérer un bon rendement de restitution du stockage (de 65 à 70 % d'après les calculs théoriques simplifiés).

Le système de stockage est constitué par un doublet de forage au Néocomien qui est un aquifère sablo-argileux situé à 900 m de profondeur. La température maximum de l'eau stockée sera inférieure à 50 °C, pour un débit maximum de 150 m^3/h, ce qui représente une puissance maximale instantanée de déstockage voisine de 9 MW.

L'ensemble du projet a fait l'objet d'études approndies qui ont donné lieu à la rédaction d'un ensemble de spécifications techniques précises.

Le projet, financé conjointement par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, la Communauté Économique Européenne et un groupement d'intérêt économique constitué entre le B.R.G.M. et la société GÉOCHALEUR, devrait être opérationnel en 1986.

POTENTIAL FOR SEASONAL STORAGE OF INDUSTRIAL SURPLUS HEAT

AVENIR DU STOCKAGE SAISONNIER DE LA CHALEUR EXCÉDENTAIRE DES INDUSTRIES

Jorgen Boldt
Technical University of Denmark
Lyngy, Denmark

A significant part of the Danish industrial gross energy consumption might be utilized for district heating purposes, but for the time being, very little is utilized. The practical possibilities for utilizing this heat depend strongly on a match between the amounts of producer and consumer heat, its time variations, and the temperature levels. One way of improving this match and thereby the potential for utilizing this surplus heat is to use thermal energy storage.

The paper addresses the problems surrounding the incorporation of thermal energy storage in district heating systems aimed at utilizing industrial waste heat. Data for 88 industrial sources of surplus heat were considered. Of these, 22 were selected as being well-suited. The matching problem is also considered on a long-term basis, taking the expanding heat demands into account.

The results, that appear as quantitative estimates of the economics and energy balances for the individual systems, will be discussed in the paper. It is difficult to draw generalized conclusions of the economical profitability on the basis of these results. However, the limitation on the usefulness of heat storage imposed by the matching problems can be generalized and discussions of this constitute the major and essential part of the paper.

Une part importante de la consommation d'énergie industrielle au Danemark pourrait être utilisée pour les besoins du chauffage urbain mais jusqu'à maintenant cette énergie est très peu utilisée. La récupération de la chaleur dépend essentiellement de l'adaptation de la production de chaleur à la consommation, des fluctuations saisonnières et des températures. Une excellente méthode d'amélioration de l'adaptation de l'offre et de la demande consiste à utiliser un stockage d'énergie thermique.

Ce document traite des problèmes d'intégration d'un stockage thermique dans un réseau de chauffage urbain capable de récupérer la chaleur industrielle. On a examiné les données de 88 sources de chaleur industrielle, excédentaire dont 22 ont été retenues. On a également examiné l'aspect à long terme de l'adaptation de l'offre et de la demande, en tenant compte des besoins grandissant d'énergie thermique.

Les résultats qui apparaissent sous la forme d'évaluations quantitatives des données économiques et des bilans énergétiques des installations particulières seront analysés dans ce document. Il est difficile d'en tirer des conclusions générales sur la rentabilité économique. Toutefois, les limites inhérentes à la disponibilité de la chaleur industrielle récupérée (adaptation à la demande) peuvent être généralisées et l'étude de ce problème constitue la partie essentielle de ce document.

EXPERIENCE WITH CHILLED WATER STORAGE IN A WATER TABLE AQUIFER

EXPÉRIENCE DE STOCKAGE D'EAU RÉFRIGÉRÉE DANS UN AQUIFÈRE

C. Everett Brett and Walter J. Schaetzle
The University of Alabama
Tuscaloosa, U.S.A.

A chilled water aquifer storage system has been operating for three years, providing air conditioning for the Student Recreation Center on The University of Alabama campus. For the last two summers the system has been providing 100 percent of the air conditioning requirement. The system will satisfy a 150 ton peak cooling load. A backup mechanical system, which has not been required since the first chilling season, will provide 100 tons for the offices and racquetball courts.

The system uses a water table aquifer with a 15m (50 ft.) saturated zone. Depth to the bottom of the aquifer varies from 21m (70 ft.) to 34m (110 ft.). The bottom of the aquifer consists of coarse sand and gravel changing to sand and clay near the surface. A prominent clay layer occurs in the center of the saturation zone. A row of three cold wells are separated by 76m (250 ft.) from a row of three warm wells. The distance between the wells in each row is 46m (150 ft.). Each well has a capacity of 200 gpm for both withdrawal and injection. Water is chilled in a cooling tower during the winter season and recovered as required for air conditioning.

The aquifer storage system is instrumented for evaluation. Data from the producing wells is recorded every few minutes by computer. Data in fifteen monitoring wells is being recorded by hand, six temperatures in each well, plus water level in six wells. The instrumentation is arranged to monitor aquifer thermal storage characteristics. Data is being analyzed to monitor effects of water injection configuration, sedimentary frame-work of the aquifer, regional flow characteristics, and thermal stratification on energy recovery efficiency.

Un système de stockage d'eau réfrigérée dans un aquifère fonctionne depuis trois ans et fournit de l'air conditionné au centre de loisirs des étudiants de l'université de l'Alabama. Ces deux derniers étés, l'installation a fourni 100 p. cent de l'air conditionné nécessaire. L'installation peut répondre à une demande de pointe de 150 tonnes de refroidissement. Une climatisation d'appoint dont le fonctionnement n'a pas encore été nécessaire depuis la première saison de climatisation, fournit 100 tonnes aux bureaux et aux salles de racquetball.

L'installation utilise l'eau d'un aquifère ayant une zone saturée de 15 m (50 pi). Le fond de l'aquifère varie entre 21 m (70 pi) et 34 m (110 pi). Il comprend du sable grossier et du gravier, puis du sable et de l'argile en surface. Au centre de la zone de saturation se trouve une couche d'argile proéminente. Les trois puits froids alignés sont espacés de 76 m (250 pi) d'une rangée de trois puits chauds. Dans chaque rangée la distance entre les puits est de 46 m (150 pi). Chaque puits a une capacité de 200 gal/min. pour le pompage et l'injection. L'eau est refroidie dans une tour au cours de l'hiver et elle est employée pour fournir de l'air climatisé à la demande.

L'installation de stockage aquifère est équipée d'instruments de mesure. Les données sur les puits sont enregistrées chaque minute par un ordinateur. Les données de quinze puits d'enregistrement sont relevées à la main six températures par puits et le niveau de l'eau de six puits. Les instruments sont disposés de façon à enregistrer les caractéristiques de stockage thermique de la nappe aquifère. Les données sont analysées ensuite pour examiner les effets de l'injection d'eau, les dépôts sédimentaires de l'aquifère, les caractéristiques des flux locaux et de la stratification thermique sur l'énergie récupérée.

ATES
EXPERIMENTAL PROJECT IN ITALY

PROJET EXPÉRIMENTAL DE STOCKAGE THERMIQUE EN AQUIFÈRE EN ITALIE

A. Carotenuto, F. Fucci, G. La Fianza,
F. Reale and V. Biggiero
University of Naples
Naples, Italy

Our ATES project regards the application of aquifer thermal energy storage in heating and conditioning of civil and industrial buildings. The aim of the project is to utilize an autonomous heating and conditioning system using a minimum amount of energy. A system of heat pumps will be utilized.

The investigations started in 1984 with a general hydrogeological survey with the purpose to select a site for thermal energy storage in an aquifer. Installation of the heat pump system is planned for 1986 after which the whole system should be put into operation.

Le projet porte sur l'application d'un stockage thermique en aquifère au chauffage et au conditionnement de l'air de bâtiments publics et industriels. Le projet vise l'exploitation d'une installation de chauffage et de conditionnement d'air autonome à faible consommation énergétique; l'utilisation de pompes à chaleur est prévue.

En 1984, un relevé hydrogéologique a été effectué dans le but de localiser un site de stockage thermique en aquifère. L'installation des pompes à chaleur est prévue en 1986, année de mise en service du projet.

INVESTIGATION OF THE VERTICAL-FLOW AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE CONCEPT AND NUMERICAL SIMULATION OF THE DORIGNY FIELD EXPERIMENT

ÉTUDE DU CONCEPT DE STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE EN AQUIFÈRE AVEC CIRCULATION VERTICALE ET SIMULATION NUMÉRIQUE DU CHAMP D'EXPÉRIMENTATION DE DORIGNY

Christine Doughty and Chin-Fu Tsang
Lawrence Berkeley Laboratory
Berkeley, U.S.A.

Recently a project sponsored by the International Energy Agency, named SPEOS (Stockage Pilote d'Energie Par un Ouvrage Souterrain) was carried out to study the seasonal storage of warm water in a shallow water-table aquifer near Lausanne, Switzerland, at Dorigny. The basic SPEOS design includes a vertical central well connected to two levels of horizontal radial drains. During summer water is continuously extracted from the lower level supply drains, heated by heat exchangers located in the central well, and injected into the upper level storage drains. This design creates a vertical fluid flow field and horizontal thermal front, minimizing the effect of natural convection. During winter the flows are reversed and heat is extracted from the withdrawn water and used for space heating. Two injection-storage-production cycles were carried out between 1982 and 1984. Lawrence Berkeley Laboratory has made a preliminary mathematical modeling study of the first cycle. Furthermore, calculations were made to study the vertical flow ATES concept in general and examine storage efficiency as a function of aquifer parameters.

At the Dorigny site, the two levels of horizontal drains are located in permeable sandy layers separated by a less permeable clay layer that effectively divides the system into two aquifers. During injection, hot water spreads laterally around the drains in the upper aquifer but does not move downward through the clay layer. This flow creates an elongated plume with large surface area and high heat loss. The numerical model PT, developed at Lawrence Berkeley Laboratory, was used to calculate the coupled fluid and heat flows in the upper aquifer for the first cycle. In this preliminary study, the aquifer was modeled as a single homogeneous layer of uniform thickness. An analytical solution for conductive losses to

Récemment, un projet parrainé par l'Agence internationale de l'énergie intitulé SPEOS (Stockage Pilote d'Énergie Par un Ouvrage Souterrain) a été mis sur pied pour étudier le stockage saisonnier d'eau chaude dans un aquifère à nappe étroite situé à proximité de Lausanne (Dorigny) en Suisse. Le projet SPEOS comprend un puits central vertical relié à deux séries de drains radiaux horizontaux situés à des niveaux différents. Au cours de l'été, l'eau est extraite en permanence du niveau inférieur, réchauffée par les échangeurs de chaleur situés dans le puits central et injectée dans les drains du niveau supérieur. Cette configuration crée une circulation dans le puits vertical et un front thermique horizontal, minimisant ainsi l'effet de la convection naturelle. Au cours de l'hiver, la circulation est inversée et la chaleur est extraite de l'eau et utilisée pour le chauffage. Deux cycles injection-stockage-pompage ont été essayés entre 1982 et 1984. Le laboratoire Lawrence Berkeley a fait une étude préliminaire du modèle mathématique du premier cycle. De plus, d'autres calculs ont été effectués pour améliorer le concept ATES de circulation verticale en général et examiner l'efficacité du stockage en fonction des paramètres de l'aquifère.

À Dorigny, les deux niveaux de drains horizontaux sont situés dans des couches sableuses perméables, séparées par une couche d'argile moins perméable qui divise le système en deux aquifères distincts. Au cours de l'injection, l'eau chaude se répand latéralement autour des drains dans l'aquifère supérieur mais ne traverse pas la couche d'argile. Cette circulation crée un panache d'eau chaude allongé avec une grande surface et de fortes pertes de chaleur. Le modèle numérique PT, développé au laboratoire Lawrence Berkeley, a été utilisé pour calculer le couplage des flux de fluide et de chaleur dans l'aquifère supérieur au cours du premier cycle. Dans cette étude préliminaire, l'aquifère a été modélisé comme

the underlying clay layer was included in the model. Heat losses to the ground surface through the unsaturated zone overlying the upper aquifer were expressed by a linear "radiation" heat flow $Q=h\ (T-T_0)$. The unknown heat transfer coefficient, h, which combines the effects of the unsaturated zone and the ground surface, was used as a fitting parameter to match experimental and calculated energy recovery factors (0.42). A regional groundwater flow was included in the model and an irregular calculational mesh that makes a gradual transition from circular to rectangular geometry was used. The 6 radial drains were approximated by a uniform disk of hot fluid generation. A good match between experimental and calculated production temperatures indicates that even with a simple one-layer model, many essential features of the Dorigny experiment can be studied. A number of additional parameter sensitivity studies were made in order to examine the relative importance of various heat-loss mechanisms and to design an optimal configuration for the Dorigny site.

une couche unique homogène d'épaisseur constante. La solution analytique prend en comptes les pertes de chaleur par conduction vers la couche d'argile sousjacente. Les pertes de chaleur à la surface du sol à travers la zone non saturée située au-dessus de l'aquifère supérieur ont été exprimées à l'aide d'une équation de transfert thermique "rayonnant" $Q=h\ (T-T_0)$. Le coefficient de transfert de chaleur inconnu, h, qui combine les effets de la zone non saturée et de la surface du sol, a été utilisé comme paramètre d'ajustement pour faire coïncider les facteurs de récupération d'énergie expérimentaux et calculés (0.42). Un écoulement souterrain régional a également été inclus dans le modèle. La grille de calcul régulière passe progressivement d'un cercle à un rectangle. Les 6 drains radiaux ont été approximés à l'aide d'un disque uniforme générant du fluide chaud. La coïncidence entre les températures de production calculées et celles mesurées indique que même avec un modèle à une seule couche la plupart des caractéristiques de l'expérience de Dorigny peuvent être étudiées. D'autres études de variation des paramètres ont permis d'examiner l'importance relative des divers mécanismes des pertes de chaleur et de concevoir une configuration optimale pour Dorigny.

In order to study the feasibility of the SPEOS vertical flow concept in general, a number of calculations were made for a hypothetical site with no clay layer, where the injected fluid flows downward toward the lower drains. A multilayer model was used for the calculations. Several key design parameters were varied in order to determine optimal system configurations for a range of conditions.

Afin d'étudier la faisabilité du concept de SPEOS à circulation verticale, un certain nombre de calculs ont été effectués pour un site hypothétique ne contenant pas de couche d'argile, c'est-à-dire où le fluide injecté s'écoule vers les drains inférieurs. Un modèle multicouches a également fait l'objet de calculs. Finalement, la variation de plusieurs paramètres de conception a permis de déterminer les configurations optimales pour une gamme donnée de conditions.

BRUNKEBERG AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE IN CENTRAL STOCKHOLM

Anders Eriksson, Sam Johansson,
Tomas Abyhammar
AIB Consulting Engineers
Solna, Sweden

Aquifer thermal energy storage for heating and air-conditioning of a large office building in the centre of Stockholm has been proposed by AIB, Consulting Engineers. Tender documents based on pumping and tracer tests have been drawn up. The building is situated on a highly permeable esker. The width of the esker is 100-200 m and the depth 10-25 m.

The aquifer storage has a capacity of 5 GWh at a temperature range of 4 to 25°C. In summertime cold water is extracted from the aquifer and used as coolant for the air-conditioning. The heated water is injected in another part of the aquifer. During the time between the warm and cold period the aquifer is used for short-time storage. In wintertime the warm water is extracted and fed to a heat pump. Approximately 1000 m^3 fuel oil are annually replaced by energy from the storage and electricity consumed by the heat pump. The system also reduces the cost of air-conditioning.

The Brunkeberg aquifer thermal energy storage is planned for construction in 1986.

STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE EN AQUIFÈRE DE BRUNKEBERG AU CENTRE DE STOCKHOLM

La société AIB a proposé de stocker de l'énergie thermique en aquifère pour chauffer et climatiser un grand immeuble de bureaux du centre de Stockholm. Les documents de soumission décrivaient le pompage et les essais avec agents traceurs. Le bâtiment se situe sur un esker fortement perméable. La largeur de cet esker est de 100 à 200 mètres et sa profondeur de 10 à 25 mètres.

Le stockage en aquifère a une capacité de 5 GWh pour une gamme de températures allant de 4 à 25 °C. En été, l'eau froide extraite de l'aquifère sert à climatiser. De l'eau chaude est alors injectée dans une autre partie de l'aquifère. Entre la saison froide et la saison chaude, l'aquifère stocke de l'énergie pendant de courtes durées. En hiver, l'eau tiède extraite alimente une pompe à chaleur. Environ 1 000 m^3 de mazout sont économisés annuellement par l'énergie provenant de ce stockage et par l'électricité consommée par la pompe à chaleur. L'installation réduit également le coût de la climatisation.

Le projet de stockage d'énergie thermique en aquifère de Brunkeberg devrait être construit en 1986.

A12

LOW TEMPERATURE THERMAL AQUIFER STORAGE

STOCKAGE THERMIQUE À BASSE TEMPÉRATURE EN AQUIFÈRE

Thomas Holm and Peter Wilén
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

The use of the conventional two well groundwater heat pump system has increased the last five years in Sweden. By reinjecting the cooled water, the water is circulated between the wells. This system causes a zone of cold water that is spread out from the injection well. If the wells can be separated far enough this is no problem for the system itself. In densely populated areas though it means that only a few houses can use the groundwater as a heat source for heat pumps. In warmer climates the system can be reversed for air-conditioning use in the summer. In climates where this is not needed it is possible to use low temperature solar collectors or wind convectors to restore the heat in the summer time. The cooled water is pumped back and is heated by the wind convectors. The amount of energy that can be restored depends on the climate conditions, type of solar collectors, hydrogeology, well design and groundwater quality.

L'utilisation de pompes à chaleur reliées à deux puits forés dans le sol s'est répandue au cours de ces cinq dernières années en Suède. En réinjectant l'eau refroidie, on fait circuler l'eau entre les puits. Cette méthode produit une zone d'eau froide qui s'étend à partir du puits d'injection. Si les puits peuvent être suffisamment éloignés l'un de l'autre il n'y a pas d'inconvénient pour l'installation elle-même. Dans les zones fortement peuplées, cela signifie que seules quelques pompes à chaleur peuvent utiliser l'aquifère comme source chaude. Dans les climats chauds l'installation peut être inversée pour refroidir les bâtiments en été. Dans les climats où cela n'est pas nécessaire, il est possible d'utiliser des capteurs solaires à basse température ou des convecteurs à air pour récupérer la chaleur en été. L'eau froide est pompée de nouveau et réchauffée par les convecteurs à air. La quantité d'énergie qui peut être récupérée dépend des conditions climatiques, du type de capteur solaire, de l'hydrogéologie, de la conception du puits et des caractéristiques des eaux souterraines.

The object studied includes heating and tapwater for a community house in Falköping in central Sweden. The total heat pump rate is 170 kW, the aquifer is a fractured sandstone at 30-60 m depth. The wells are separated by 85 m and have a capacity of 15 l/s each. The groundwater heat pump system will be installed in the beginning of 1985.

L'étude porte sur le chauffage et l'alimentation en eau d'une maison communautaire située à Falköping au centre de la Suède. La pompe à chaleur a une puissance de 170 kW, l'aquifère est composé de grès fracturé de 30 à 60 mètres de profondeur, les puits sont distants de 85 m et ont un début de 15 L/s chacun. L'installation de la pompe à chaleur commencera au début de 1985.

The previous study includes an investigation of the groundwater conditions in the area. This includes well boring, well logging, pumping tests, tracer test, and groundwater chemistry analyses.

L'étude précédente comprend des travaux de recherche sur les caractéristiques des eaux souterraines dans la région, notamment le forage de puits, des données sur les puits, des essais de pompage, des essais de repérage à l'aide d'un traceur et des analyses chimiques des eaux souterraines.

To predict the thermo-hydraulic behaviour of the aquifer, computer simulations have been done, as well as analytical calculations.

Pour prédire le comportement thermo-hydraulique de l'aquifère des simulations sur ordinateur ont été effectuées ainsi que des

The used mathematical model, consisting of a two well, finite difference program, is developed at the Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology.

The results show the general possibilities and limitations for this kind of system as well as the possibilities for the object studied.

The following subjects will be studied as the research project continues:

- Groundwater temperatures and flows
- Heat pump efficiency
- Groundwater chemistry (scaling & clogging)
- Efficiency of wind convectors
- Water and energy balance in the aquifer.

calculs analytiques. Le modèle mathématique utilisé pour deux puits, fonctionne selon un programme basé sur des éléments finis et est mis au point au département de physique et de mathématique du Lund Institute of Technology.

Les résultats montrent les possibilités et les limites de ce type d'installation, ainsi que les possibilités offertes par ce genre de stockage.

Les sujets suivant seront également étudiés:

- Températures et écoulements des eaux souterraines
- Rendement des pompes à chaleur
- Chimie de l'eau souterraine (durcissement et entartrage)
- Rendement des convecteurs à air
- L'eau et l'équilibre énergétique dans l'aquifère.

PROTOTYPE OF UNDERGROUND HIGH-TEMPERATURE HEAT STORAGE IN THIVERVAL-GRIGNON (FRANCE)

PROTOTYPE DE STOCKAGE SOUTERRAIN DE CHALEUR À HAUTE TEMPÉRATURE À THIVERVAL-GRIGNON (FRANCE)

Bernard A. Housse
Société Nationale Elf-Aquitaine, Paris, France
Jacques Despois
Commissariat à l'Énergie Atomique, Paris, France

In 1975, the Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) and the Société Nationale ELF Aquitaine began a co-operative effort to study the feasibility of underground heat storage. They quickly learned the importance of the combination of a temperatute ⩾ 180°C and a reservoir depth ⩾ 200 m, bearing in mind the relationship between thermal losses and temperature, thermal yield, the sizing of surface installations, and the performance of natural reservoirs.

It was determined that the apparatus required in order to take full advantage of the potential savings offered by this type of storage, would have to include a central well (called hot), for storage and storage retrieval from hot water, and peripheral wells (called cold) arranged in a circle around the central well and alternately pumped out and filled in such a way as to form two loops with the central well; in addition, all wells would play a role in regulating the volumes of superheated rocks.

In 1979, The Thiverval-Grignon site was selected for a demonstration project which would store the heat dissipated in the operation of a household garbage incineration plant and use the heat retrieved to supply the neighbouring municipality of Plaisir. Test drilling was carried out in 1980 to determine the characteristics of the experimental system:

- Natural reservoir suitable for heat storage - detrital Wealdian sequence between the depths of 478 and 530 m, permeated by fresh water.
- Level chosen for the demonstration project - sands between 486 and 500 m (beds of 2.5 m + 9m).

Le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) et la Société Nationale ELF-AQUITAINE ont engagé une collaboration en 1975 pour étudier la faisabilité des stockages souterrains de chaleur. Ils ont dégagé rapidement l'intérêt de la filière: Température ⩾ 180 °C - Réservoir ⩾ 200 m de profondeur; en considérant la relation entre pertes thermiques et température, le rendement thermique, le dimensionnement des installations de surface, les performances des réservoirs naturels.

Le dispositif permettant de maîtriser l'économie de ce type de stockage a été défini comme devant comporter un puits central (dit chaud) pour le stockage et le déstockage d'eau chaude, et des puits périphériques (dit froids) répartis sur un cercle autour du précédent, soumis alternativement à exhaure et injection de façon à former deux boucles avec le puits central; et assurant également tous contrôles du volume de roches surchauffées.

En 1979 le site de Thiverval-Grignon a été retenu pour une opération de démonstration bénéficiant de la chaleur dissipée par l'exploitation d'une usine d'incinération d'ordures ménagères et du débouché offert par la ville voisine de Plaisir pour l'utilisation de la chaleur déstockée. Un sondage de reconnaissance a été effectué en 1980 permettant de préciser les caractéristiques du système expérimental qui se présente comme suit:

- Réservoir naturel propice au stockage de chaleur = série détritique du Wealdien entre 478 et 530 m de profondeur, imprégnée d'eau douce.
- Niveaux retenus pout la démonstration = sables entre 486 et 500 m (bancs de 2,5 m + 9 m).

- Peripheral wells (including test holes fitted for use in a circle with a radius = 85 m).

- Peripheral wells 2 and 3 to deviate from the central well platform so as to limit the amount of land occupied.

The demonstration project revealed the following parameters:

- Temperature of water injected into the central well during the summer (storage phase) = 180°C.

- Temperature of water reinjected into the peripheral wells during the winter (retrieval phase) - return temperature at the system = 70°C.

- Temperature of water produced (retrieval phase) = 180°C⟶75°C.

- Rate of flow in the central well during injection = 100 m^3/h.

- Rate of flow in the central well during pumping = 100 m^3/h⟶5m^3/h.

- Quantity of heat retrieved = 19,600 MWh, which represents a yield of 60%.

This prototype unit also required an intricate water treatment system for decarbonation and desilication, as well as special pump equipment (cf temperature) connected to injection control and safety devices for the central well.

The storage facility is planned to be operational by April-May 1986 (injection of heat not used by the municipality of Plaisir by a direct connection to the incineration plant) and the first storage retrieval is planned for the winter of 1986-1987, with an anticipated optimum yield of 60% after 4 cycles.

- Rayon du cercle sur lequel sont positionnés les puits périphériques (y compris le sondage de reconnaissance équipé comme tel) = 85 m.

- Puits périphériques 2 et 3 à forer en déviation à partir de la plateforme du puits central pour limiter l'occupation des sols.

La démonstration mettra en jeu les paramètres suivants:

- Température de l'eau injectée en été dans le puits central (phase stockage) = 180 °C.

- Température de l'eau réinjectée en hiver dans les puits périphériques (en déstockage) = température retour du réseau = 70 °C.

- Température de l'eau produite (en déstockage) = 180 °C⟶75 °C.

- Débit au puits central en injection = 100 m^3/h.

- Débit au puits central en exhaure = 100 m^3/h⟶5 m^3/h.

- Quantité de chaleur déstockée = 19 600 MWh avec Rendement = 60 %.

Ce prototype nécessite en outre une installation complexe de traitement d'eau pour décarbonatation et désiliciage et un équipement spécial (cf. température) de pompage dans le puits central associé à des dispositifs de contrôle d'injection et de sécurité.

La mise en service du stockage est prévue en avril-mai 1986 (injection de chaleur non utilisée par la ville de Plaisir connectée directement à l'usine d'incinération) avec premier déstockage en période d'hiver 1986-1987 et obtention du rendement optimum (60 %) après 4 cycles.

SHORT-TERM AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE (ATES) TEST CYCLES, ST. PAUL, MINNESOTA, U.S.A.

STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE À COURT TERME EN AQUIFÈRE (ATES) CYCLES D'ESSAI, ST. PAUL, MINNESOTA, ÉTATS-UNIS

M.C. Hoyer, Matt Walton, R. Kanivetsky, Minnesota Geological Survey
St. Paul, U.S.A.
T.R. Holm, Illinois State Water Survey
Champaign, U.S.A.

Four short-term field ATES experiments using the Franconia-Ironton-Galesville confined aquifer were conducted at the University of Minnesota, St. Paul campus, Field Test Facility. For each test approximately 1.2 x 10^4 m^3 of aquifer water were pumped at a rate of 18 liters per second for 8 days from the source well, passed through a heat exchanger which raised the temperature by 66°C, and returned to the aquifer at the storage well. The water was stored for about 10 days, and was then pumped from storage and passed through a heat exchanger to recover the energy. During recovery a volume of water equal to that pumped into storage was returned to the supply well.

Several mechanical problems caused delays in preparation for these tests. Furthermore, the fact that the ground water is of a calcium-magnesium bicarbonate type, posed the problem of calcium-carbonate scaling throughout the system. Installation of a precipitator, however, allowed scale to accumulate above ground and prevented fouling of the wellscreen.

Major results of these tests are summarized below:

	Head Added (10^{12} Joules)	Storage (days)	Heat Recovered (10^{12} Joules)	Energy Recovery Factor
Cycle 1	2.77	13	1.63	0.59
Cycle 2	3.90	90*	1.78	0.46
Cycle 3	3.56	10	2.22	0.62
Cycle 4	3.12	10	1.81	0.58

* Mechanical problems caused the storage period to be prolonged.

Quatre essais ATES à court terme utilisant l'aquifère captif de Franconia-Ironto-Galesville ont été effectués à l'université du Minnesota, campus St-Paul, Laboratoire d'essai in situ. À chaque essai, environ 1.2 x 10^4 m^3 d'eau de l'aquifère ont été pompés du puits d'extraction à un débit de 18 litres par seconde pendant 8 jours. Cette eau passait dans l'échangeur de chaleur qui élevait la température de 66 °C, puis elle était réinjectée dans l'aquifère par le puits d'injection. L'eau stockée pendant environ 10 jours a ensuite été pompée de nouveau afin d'en récupérer l'énergie au moyen de l'échangeur de chaleur. Au cours de la récupération un volume d'eau égal à celui pompé dans le stockage a été renvoyé par le puits d'injection.

Plusieurs défaillances mécanique ont provoqué des retards durant les essais. De plus, l'eau souterraine contenant du bicarbonate de calcium-magnésium a causé l'entartrage de l'installation. L'installation d'un précipitateur a toutefois empêché l'entartrage au-dessus du sol et a évité le blocage de la crépine d'injection.

Les principaux résultats de ces essais sont résumés ci-dessous:

	Chaleur Ajoutée (10^{12} Joules)	Stockage (jours)	Chaleur récupérée (10^{12} Joules)	Taux de récupération d'énergie
Cycle 1	2.77	13	1.63	0.59
Cycle 2	3.90	90*	1.78	0.46
Cycle 3	3.56	10	2.22	0.62
Cycle 4	3.12	10	1.81	0.58

* Des défaillances mécaniques ont entraîné une période de stockage plus longue.

Hydraulic and thermal responses of the aquifers and confining beds were monitored and were in expected ranges. Highest temperatures recorded in minotor wells located 7 and 14 m from the storage well were equal to the injected water temperature. Major-ion composition of the injected and recovered waters followed expected trends. In particular, silica increased and calcium decreased with increased temperature in the recovered water. Aquifer modeling results of the test cycles by the U.S. Geological Survey are in close agreement (+2%) with field results.

A season-length test-cycle using ion-exchange water softening to prevent scaling began in November 1984 and concluded in May 1985.

On a enregistré les caractéristiques hydrauliques et thermiques des aquifères et des poches de confinement. Les résultats correspondaient aux prévisions. Les températures les plus hautes enregistrées dans les puits de mesure situés à 7 et 14 m du puits de stockage étaient égales à la température d'injection. La composition ionique de l'eau injectée et récupérée correspondait aux valeurs prévues. En particulier, le taux de silice augmentait et le taux de calcium diminuait lorsque la température de l'eau de récupération augmentait. Les résultats des cycles d'essai sur modèle par le U.S. Geological Survey sont en accord avec les résultats des essais réels (écart de +2 %).

Un cycle d'essai de stockage saisonnier avec échange d'ions pour adoucir l'eau et éviter l'entartrage a commencé en novembre 1984 et se terminera en mai 1985.

AQUIFER HEAT STORAGE TECHNOLOGY IN SWEDEN

LE STOCKAGE THERMIQUE EN AQUIFÈRE EN SUÈDE

Hans Hydén
SWECO, Swedish Consulting Group
Stockholm, Sweden

Several low-temperature aquifer heat-storage projects are now being implemented or under design in Sweden. The heat storages are normally used for storing heat from warm surface water in the summer to be used as heat sources for heat pumps in the winter. The heat pumps in these projects are in the range 0,5-10 MW heat. Several methods for charging the heat are being tested.

During the construction and operation of the storage facilities various potential technical problems are carefully evaluated. These primarily concern the thermal behaviour and efficiency of the storage facilities, well design, and water chemistry problems (deposits, corrosion, clogging). Environmental aspects of the various installations are also being evaluated.

The experience from the installations which have been or will soon be implemented will form a firm basis for the evaluation of the technical and economic feasibility of aquifer heat-storage facilities in Sweden.

Plusieurs projets de stockage thermique en aquifère à basse température sont actuellement en cours de conception ou de réalisation en Suède. Les stockages thermiques servent généralement à accumuler de la chaleur provenant d'eaux de surface chaudes en été; cette chaleur peut ensuite servir de source chaude pour les pompes à chaleur en hiver. Les pompes à chaleur utilisées pour ces projets ont une puissance de l'ordre de 0.5-10 MW. Plusieurs méthodes de stockage de la chaleur sont mises à l'essai.

Divers problèmes techniques potentiels sont évalués au moment de la construction et du fonctionnement des installations de stockage. Ils touchent plus particulièrement le rendement thermique et l'efficacité du stockage, la conception du puits, et les problèmes chimiques de l'eau (dépôts, corrosion, entartrage). On évalue aussi les conséquences du point de vue du milieu des diverses installations.

L'expérience acquise à partir des installations déjà mises en oeuvre ou en voie d'élaboration fournira une base solide pour l'évaluation de la faisabilité technique et économique des stockages thermiques en aquifère en Suède.

HEAT STORAGE AND HEAT PUMPS ON AQUIFER - TWO CASE STUDIES

STOCKAGE DE CHALEUR EN AQUIFÈRE ET POMPES À CHALEUR - DEUX ÉTUDES DE CAS

P. Iris, P. Viennot
École des Mines, Fontainebleu, France
J.Y. Ausseur, J.P. Sauty
B.R.G.M., Orléans, France

Groundwater of generally constant temperature acts as a good cold source for refrigerating machines (heat pumps) used for heating and cooling. Two pilot demonstration projects, which have been operational for several years, are outlined in the paper. They involve the thermal exploitation of a regional aquifer (depth approximately 80 m, temperature 13°C, average rate of flow on drilling 60 m^3/hr.) which could be quite valuable to the urban area of the Paris region in France.

The first, at Aulnay-sous-Bois, involves 224 collective housing units and is based on the principle of the heliogeothermic pair; in other words, the water which is cooled in winter by heat pumps and reinjected into the aquifer, is repumped in summer and restored to its initial temperature by static exchangers. These devices remove calories from the outside air. (The average air temperature in Paris during summer is approximately 18°C).

Static exchangers, which have been in use since 1983, reduce the disturbance of the underground environment that results from the cold produced by the withdrawal of heat by the heat pumps. These exchangers also increase the possibilities of making use of the aquifer in urban areas.

The second operation, in Montreuil, heats and cools tertiary premises from the same aquifer. This paired-well system, with hot and cold storage, has been in operation since 1982. The hot storage is fed by the cooling system discharge in summer and adds to the available cold source power of the heat pumps in winter (increase in the number of degrees Celsius that can be drawn from the water table). Cold storage takes place in winter

Les nappes souterraines dont la température est, en général, constante, représentent une bonne source froide pour les machines frigorifiques (pompes à chaleur) pour le chauffage et la climatisation. Deux opérations pilotes de démonstration, en fonctionnement depuis quelques années, sont présentées dans la communication. Elles portent sur l'exploitation thermique d'une nappe régionale à 80 m de profondeur environ, 13 °C et de débit moyen par forage de 60 m^3/H, qui représente une cible très intéressante pour la zone urbaine de la région parisienne en France.

La première, à Aulnay-sous-Bois, concerne 224 logements collectifs et utilise le principe du doublet héliogéothermique, c'est-à-dire que l'eau refroidie en hiver par les pompes à chaleur et reinjectée dans la nappe, est repompée en été et remise à sa température initiale à l'aide d'échangeurs statiques prélevant les calories sur l'air extérieur (dont la température moyenne en été est, à Paris, de 18 °C environ).

Ce dispositif, qui fonctionne depuis 1983, permet de réduire la perturbation froide dans le milieu souterrain due au prélèvement de chaleur par les pompes à chaleur, et augmente les possibilités d'usage de la nappe en zone urbaine.

La seconde opération, à Montreuil, assure, à partir de la même nappe, le chauffage et la climatisation de locaux à usage tertiaire. Il y a un doublet de puits, avec un stockage chaud et un stockage froid (l'opération fonctionnne depuis 1982). Le stockage chaud provient des rejets de climatisation en été et accroît en hiver la puissance disponible en source froide des pompes à chaleur (augmentation du nombre de degrés celsius

at the outlet of the evaporators and results in an increased cooling capacity.

As in the first example, the system is adjusted to ensure the thermal balance of the aquifer. It allows a single investment for both heating and cooling and does not require the use of cooling towers in the summer. In all likelihood, it could find many applications in North America. With regard to these two operations, the paper deals with technological aspects, economic feasibility and concepts of thermal management of the aquifer.

prélevables sur l'eau de la nappe). Le stockage froid s'effectue en hiver en sortie des évaporateurs et permet d'accroître la capacité de la climatisation.

Le système est, comme dans le premier exemple, calculé pour assurer l'équilibre thermique de la nappe. Il permet de faire un investissement unique pour le chauffage et la climatisation, et ne nécessite pas l'emploi de tours de refroidissement pour la climatisation en été. Il peut vraisemblablement trouver de nombreux exemples d'application sur le continent nord-américain. Pour ces deux exemples, la communication traite des aspects technologiques, de la faisabilité économique de ces systèmes et des concepts de gestion thermique de la nappe.

COMPARISON OF LONG-TERM ATES EXPERIMENTS TO 3-D COMPUTER SIMULATIONS

STOCKAGES THERMIQUES EN AQUIFÈRE À LONG TERME ET SIMULATIONS TRIDIMENSIONNELLES PAR MODÈLES INFORMATIQUES

M.T. Kangas, P.D. Lund, Helsinki University of Technology
Espoo, Finland
T. Laitinen, Vesi-Hydro Ltd.
Helsinki, Finland

Aquifers offer a simple and potential way of storing heat for long periods of time. Finnish aquifers, called eskers, often have high permeability and hydraulic gradients causing considerable groundwater flows (up to 1000 - 2000 m/year). Planning of storage systems thus requires accurate knowledge of the thermal processes within the storage and in the surroundings. The high groundwater flow rate necessitates the use of separate wells for charging and recovery, and it also makes the effect of buoyancy-induced tilting more pronounced. To account for the complex phenomena present in an esker thermal storage, numerical computer models are needed.

Within the framework of this study, a 3-dimensional numerical computer model for an aquifer thermal energy storage (ATES) has been developed. The verification of the model is presently going on. The model employs upwind finite difference approximation to simulate the flow of water and heat. The possibility to define a hydraulic gradient in two perpendicular directions enables the use of different flow geometries. Well screens for charging and recovery can be located in any of the nodal points.

The verification of the model is done with the aid of field measurements made continuously since 1974. In these experiments, cooling water (T = +23°C) from a factory has been infiltrated into an aquifer at a rate of 1200 m^3 per day. At the same time, groundwater has been pumped out at 3350 m^3 per day. The distance between the charging area and the recovery wells has been 700 metres, the slope of the water table being 0.35-0.6 per cent. During the ten

Les aquifères offrent un moyen simple de stocker de la chaleur à long terme. En Finlande, les aquifères, appelés eskers, ont des gradients hydrauliques et de perméabilité élevés, ce qui entraîne des flux importants d'eaux souterraines (jusqu'à 1 000 - 2 000 m par an). C'est pourquoi il faut bien connaître les mécanismes thermiques à l'intérieur du stockage et à proximité de celui-ci au moment de la planification des installations. Il faut prévoir l'utilisation de deux puits distincts pour l'injection et le déstockage, à cause du débit élevé des eaux souterraines qui a d'ailleurs aussi tendance à accentuer l'effet de l'inclinaison due à la poussée de l'eau. Comme le stockage thermique dans les eskers constitue un processus complexe, le recours à des modèles informatiques s'impose.

Dans le cadre de cette étude, on a mis au point un modèle informatique tridimensionnel applicable à un stockage thermique en aquifère. Le modèle est actuellement en cours de vérification, et il utilise les flux d'eau et de chaleur. La possibilité de définir un gradient hydraulique dans deux directions perpendiculaires permet l'utilisation de configurations de flux différentes. Les puits de stockage et de déstockage peuvent être situés à l'un quelconque des points nodaux.

La vérification du modèle est effectuée au moyen de mesures in situ prises de façon continuelle depuis 1974. Au cours de ces expériences, on a injecté dans un aquifère, à raison de 1 200 m^3 par jour, de l'eau de refroidissement (T = +23 °C), provenant d'une usine. Simultanément, on a extrait de l'eau du sous-sol à raison de 3 350 m^3 par jour. Une distance de 700 mètres séparait la zone de stockage des puits de déstockage. La pente de la nappe phréatique était de

years, the average recovery factor has been between 0.7-0.8.

Besides storage applications, the model will be used to analyse the hydrothermal behaviour of a full-scale heat pump system employing ground water as a heat source. In these systems, cooled water from the evaporator of the heat pump is fed back into the aquifer, thus corresponding to storage of chilled water.

0.35-0.6 pour cent. Au cours des dix dernières années, le taux moyen de récupération se situait entre 0.7 et 0.8.

Le modèle, en plus de servir à des applications de stockage, sera destiné à l'analyse du comportement hydrothermique d'une installation en vraie grandeur avec pompes à chaleur utilisant les eaux souterraines comme source de chaleur. Dans ce type d'installation, l'eau refroidie en provenance de l'évaporateur de la pompe à chaleur est injectée dans l'aquifère, ce qui correspond au stockage d'eau refroidie.

AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS WITH TWO AQUIFERS

STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE DANS DEUX AQUIFÈRES

K.C. Lau, Strata Engineering Inc.
A.M. Crawford, University of Toronto
C. Mirza, Strata Engineering Inc.
Toronto, Canada

Recently there has been an increased use of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems for the conservation of energy in large office buildings. Typically in ATES projects with one aquifer, the injection and production wells are located as far apart as possible, usually at the boundaries of the site. This is done in order to reduce the possible mixing of the stored hot and cold water in the aquifer. Such location of wells may cause thermal contamination of the aquifer beyond the property limits and in future may lead to legal problems.

One possible solution to this potential problem, at site where two independent aquifers co-exist, may be to use a central injection/production system such that hot water is stored in one aquifer and the cold water in another. With such an arrangement the extent of thermal contamination could be restricted to within the property limits. An example of such a site is at Scarborough, Ontario.

In this paper the factors which affect the efficiency of both one and two aquifer system is examined by means of a parametric study utilizing analytical procedures. This work will subsequently be applied to the Scarborough site to demonstrate the feasibility of using both existing aquifers for energy storage.

Depuis peu on utilise davantage le stockage d'énergie en aquifère (ATES) pour économiser de l'énergie dans les grands immeubles de bureaux. En général dans les ATES utilisant un seul aquifère les puits d'injection et de pompage sont situés aussi loin que possible l'un de l'autre, le plus souvent aux limites du site. Cette précaution vise à éviter le mélange de l'eau chaude et de l'eau froide dans l'aquifère. Une telle implantation des puits peut entraîner une "contamination" thermique au-delà des limites de propriété et conduire à des conflits juridiques.

Il existe une solution immédiate lorsque sur le site coexistent deux aquifères. On peut alors employer une installation centrale d'injection et de pompage fonctionnant de sorte que l'eau chaude soit stockée dans un aquifère et l'eau froide dans l'autre. Avec cette disposition, la "contamination" thermique peut être confinée à l'intérieur des limites de propriété. On trouve un site semblable à Scarborough, en Ontario.

Dans cette étude les facteurs qui influent sur le rendement des installations à un ou deux aquifères sont examinés au moyen d'analyses des paramètres. Cette étude servira sur le site de Scarborough pour démontrer qu'il est possible d'utiliser à la fois deux aquifères pour stocker l'énergie.

PROJECT FOR LOW-TEMPERATURE STORAGE OF SOLAR HEAT IN KLIPPAN, SWEDEN

PROJET DE STOCKAGE SOLAIRE À BASSE TEMPÉRATURE À KLIPPAN (SUÈDE)

Leif Lemmeke and Bertil Sundlöf
VBB/SWECO, Swedish Consulting Group
Malmoe, Sweden

A special method for large scale domestic heating by means of heat pumps and district heating was presented a few years ago. The method is based on the use of solar heat as the heat source. During the summer surface water is used as a solar colletor and the heat collected is transferred to groundwater and stored in aquifers. Thus a "natural" heat source is created that retains summer temperatures throughout the year.

In order to assess the potential for heat storage in aquifers and an application of the method in Sweden a general survey was previously carried out. Taking into account both the geological conditions and the actual heating demands in existing built-up areas, as well as economic aspects, the survey showed that 18 per cent of the total heating demand in Sweden could be supplied by the method described.

This method has now been applied in Sweden for the first time. In the town of Klippan in southern Sweden a heat production plant with a heat pump of 2 MW, a heat storage of almost 1 million cubic meters and other facilities have been set up and put into operation. The operation of the plant is monitored and registered by a supervision-system and in order to optimize the operation of the heat storage the performance is simulated by means of a mathematical model.

In the paper the plant and the local conditions are described, the operational results accounted for, the construction and operational costs shown, and the performance of the heat storage illustrated.

Une méthode spéciale de chauffage résidentiel à grande échelle au moyen de pompes à chaleur et du chauffage urbain a été présentée il y a quelques années. La source de chaleur utilisée par cette méthode est le soleil. Au cours de l'été, l'eau de surface est utilisée comme capteur solaire et la chaleur captée est transmise à l'eau souterraine et est stockée dans les aquifères. Une source de chaleur "naturelle" est ainsi créée pour emmagasiner la chaleur estivale et permettre de l'utiliser toute l'année.

Une analyse générale avait auparavant été effectuée afin d'évaluer le potentiel du stockage thermique dans les aquifères ainsi qu'une application de cette méthode en Suède. Tenant compte des conditions géologiques et des besoins actuels de chauffage dans les zones construites existantes, en plus des aspects financiers du sujet, l'étude a démontré que 18 % des besoins de chauffage de toute la Suède pouvaient être satisfaits par la méthode décrite.

Cette méthode a maintenant été appliquée en Suède pour la première fois. Une centrale de chauffage équipée d'une pompe à chaleur d'une puissance de 2 MW, un stockage thermique d'environ 1 million de mètres cubes et d'autres installations ont été construites dans la ville de Klippan, dans le sud de la Suède. Le fonctionnement de la centrale est contrôlé et enregistré par un système de surveillance. De plus, le rendement du stockage thermique est simulé par un modèle mathématique afin d'en optimiser l'exploitation.

Ce document décrit la centrale et les conditions locales, expose les résultats d'exploitation, révèle les coûts de construction et d'exploitation et illustre le rendement du stockage thermique.

PROJECT OF THERMAL STORAGE IN DEEP AQUIFER (SARCELLES, FRANCE) SIMULATION OF THE HYDRAULIC AND THERMAL BEHAVIOUR OF THE SYSTEM

PROJET DE STOCKAGE THERMIQUE EN AQUIFÈRE PROFOND (SARCELLES, FRANCE) SIMULATION DU COMPORTEMENT HYDRAULIQUE ET THERMIQUE DU SYSTÈME

A. Menjoz et A. Boisdet
Institut Mixte de Recherches Géothermiques (BRGM/AFME)
Orléans, France

The aquifer thermal storage project under consideration in Sarcelles, north of Paris, involves a seasonal storage, paired-well system in a sandy reservoir located between 880 m and 940 m beneath the surface (Neocomian), which is to provide heat for a complex of approximately 920 housing units.

The objectives of the project and the advance theoretical estimates that have been computed are based on three main features:

(i) This is an actual-scale project based on classic technology used in low-enthalpy geothermics. The power of the system is similar to that of a conventional two-well system in the Dogger series of the Paris Basin.

(ii) Consumption statistics for the existing distribution network which have been gathered over the past several years have enabled us to assess whether the production characteristics of the system will be equal to consumption over demands over time. It has also allowed us to evaluate the rate at which energy demands are met and thus attempt to devise an optimal method of managing what is stored during summer.

(iii) The summer production system - the "Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères" (household waste disposal plant) - is equipped with a recovery system. Known surpluses of recoverable energy can be stored almost continuously for five months of the year.

The forecasts based on theoretical simulations concern: the hydraulic and thermal behaviour of the reservoir as a function of the operational demand and geological inferences, the effect of the method of storage and recovery and the bases of the overall management model, integrating

Le projet de stockage thermique en aquifère envisagé à Sarcelles, au nord de Paris, est un stockage saisonnier par doublet de forages exploitant un réservoir sableux situé entre 880 m et 940 m de profondeur (Néocomien), pour la fourniture de chauffage d'un ensemble de 920 logements environ.

Trois caractéristiques principales permettent de définir les objectifs du projet et les estimations théoriques préalables effectuées:

(i) Il s'agit d'un projet à l'échelle réelle reposant sur la technologie classique utilisée en géothermie basse enthalpie; la puissance du système est du même ordre que celle d'une opération conventionnelle par doublet exploitant le Dogger du bassin parisien.

(ii) Sur le réseau de distribution existant, les statistiques de consommation relevées depuis plusieurs années permettent l'examen de l'adéquation des caractéristiques de production du système à celles de consommation au cours du temps, ainsi que l'évaluation du taux de couverture énergétique des besoins; d'où la recherche d'un mode de gestion optimal du stock constitué en été.

(iii) Le système de production estival (Usine d'Incinération d'Ordures Ménagères) est équipé de son dispositif de récupération: l'énergie excédentaire utile connue peut être stockée de manière quasi-continue durant 5 mois par an.

Les prévisions réalisées par simulations théoriques concernent: le comportement hydraulique et thermique du réservoir en fonction des sollicitations d'exploitation et des hypothèses géologiques, l'incidence du mode de stockage et de récupération, ainsi que les bases du modèle de gestion d'ensemble

the coupling between the project's underground system and the existing surface system. This model is particularly useful for quantifying the energy gain that can be expected from the system, the effect of economic parameters and the project's overall financial viability.

This industrial project, which should be completed in 1985-86, is financed jointly by the Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, the European Economic Community and the Groupement d'Intérêt Économique, which includes the Société Géochaleur and the B.R.G.M.

intégrant le couplage entre le dispositif souterrain en projet et le système de surface existant. Ce dernier modèle est particulièrement important pour apprécier quantitativement: le gain énergétique à attendre du système, l'influence des paramètres économiques, et l'équilibre financier global du projet.

Ce projet industriel qui devrait être réalisé en 1985-1986 est co-financé par l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie, la Communauté Économique Européenne et un Groupement d'Intérêt Économique constitué entre la société Géochaleur et le B.R.G.M.

ATES EXPERIENCE WITH THE SCARBOROUGH FIELD TRIAL

LE STOCKAGE THERMIQUE EN AQUIFÈRE - LE PROJET DE SCARBOROUGH

C. Mirza and K.C. Lau, Strata Engineering Corp., Toronto, Canada
E.L. Morofsky, Public Works Canada, Ottawa, Canada
A.M. Crawford, University of Toronto, Toronto, Canada

Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) is a relatively new energy conservation technology. Theoretical work at Lawrence Berkeley Laboratories in California and elsewhere in the early 1970's was followed in the late 1970's by limited scale field trials at several experimental sites in the United States and in some parts of Europe. Canada is at the forefront of commercially implementing this technology. Two full scale field demonstration projects have been installed on an existing building and a new building in Toronto, Ontario.

This paper describes the ATES trial at the Canada Centre building - a Public Works Canada project in Scarborough, Ontario. This project has been used as the Canadian contribution for Task 7 of the International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Program. An overview of the Scarborough ATES project is described.

Le stockage d'énergie thermique en aquifère constitue une nouvelle technologie en matière d'économie d'énergie. Des études théoriques ont été effectuées au début des années 1970 aux Laboratoires Lawrence Berkeley en Californie et ailleurs, pour faire place ensuite, vers la fin des années 1970, à des essais sur le terrain à divers sites aux États-Unis et en Europe. Le Canada se trouve au premier plan pour l'exploitation commerciale de cette technologie. Deux projets de démonstration en vraie grandeur ont été réalisés à Toronto (Ontario), l'un dans un immeuble existant et l'autre dans un immeuble neuf.

Ce document présente le projet de stockage thermique en aquifère de l'immeuble Canada Centre, mis au point par Travaux publics Canada à Scarborough, en Ontario. Ce projet constitue la participation du Canada aux travaux du Groupe de travail VII de l'Agence internationale de l'énergie - Programme solaire de chauffage et de refroidissement. Un aperçu du projet de Scarborough est présenté.

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A HEATED WATER INJECTION EXPERIMENT IN AN UNCONSOLIDATED AQUIFER

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN ESSAI D'INJECTION D'EAU CHAUDE DANS UN AQUIFÈRE NON CONSOLIDÉ

Carl D. Palmer
University of Wisconsin-Milwaukee, Milwaukee, U.S.A.
David W. Blowes and Emil O. Frind
University of Waterloo, Waterloo, Canada

As part of a program to evaluate the use of unconfined aquifers for thermal energy storage (ATES), a hot water injection and storage experiment was conducted at Canadian Forces Base Borden in the Fall of 1984. During this experiment 53.5 cubic meters of heated water was injected into a shallow, sandy aquifer at a rate of 0.0062 cubic meters per minute over a period of 6 days. The water, derived from the same aquifer, was pumped from a source well 60 meters west of the injection well. The water was heated to 36°C and a bromide tracer was added as it was being pumped to the injection well. The injection well was a 0.05 meter in diameter and had a 2 meter screen set at 5.3 meters below ground surface. Bundle-type piezometers were used to provide a cost-effective, three-dimensional monitoring network. These bundles permitted the collection of small volumes of water samples, the measurement of waterlevels, and downhole measurement of temperature. Temperatures were measured in the screened interval of the bundle tip using either commercially available thermistors or thermistors constructed from 10 K⎍ thermistor tips. Sixteen of these constructed thermistors were connected to a microprocessor system with automatic recording capability. Initially, the thermistors connected to the microprocessor system were scanned every minute. Later in the injection period of the experiment, the scanning interval was increased to 10 minutes. The remaining thermistors were read manually. Monitoring of the injected slug of heat continued for 135 days following the injection period to provide information about the storage phase of an ATES cycle.

Au cours de l'automne 1984, une expérience d'injection d'eau chaude et de stockage de la chaleur a été menée à la base des Forces canadiennes de Borden dans le cadre d'un programme d'étude du stockage de l'énergie thermique dans les aquifères non confinés (ATES). Au cours des essais 53.5 mètres cubes d'eau chaude ont été injectés dans un aquifère sableux et étroit avec un débit de 0,0062 mètres cube par minute pendant 6 jours. L'eau provenant du même aquifère était pompée dans un puits situé à 60 mètres à l'ouest du puits d'injection. L'eau était entre temps réchauffée à 36 °C et on y a ajouté un traceur au bromure avant de l'injecter au moyen d'une pompe. Le puits d'injection avait un diamètre de 0,05 mètre et une partie crépinée de 2 mètres située à 5.3 mètres dans le sol. Des piézomètres du type en U ont permis d'enregistrer les données économiquement selon un réseau tridimensionnel. Ce réseau a permis de collecter des petits échantillons d'eau, de mesurer les niveaux de l'eau et les températures en profondeur. Les températures ont été mesurées le long de la partie crépinée au moyen de thermistors commerciaux ou construits avec des boucles de 10 K⎍. Seize de ces thermistors construits spécialement ont été reliés à des microprocesseurs permettant un enregistrement automatique. Au début, les thermistors transmettaient les données aux microprocesseurs chaque minute. Ensuite, au cours de la période d'injection l'intervalle des relevés de données a été porté à 10 minutes. Les autres thermistors servaient aux lectures directes. L'enregistrement des températures s'est poursuivi pendant 135 jours après la période d'injection de façon à obtenir des renseignements sur la phase de stockage pendant un cycle complet.

RESEARCH ON ENERGY STORAGE IN THE UNDERGROUND WATER AND ITS QUALITY IN CHANGZHOU CITY

RECHERCHE SUR LE STOCKAGE D'ÉNERGIE DANS L'EAU SOUTERRAINE ET SUR LA QUALITÉ DE CETTE EAU DANS LA VILLE DE CHANGZHOU

Guo-Jun Shen, Ya-bai Tang and Bing-Qian Pang
The Geological Bureau of Jiangsu Province
Nanjing, People's Republic of China

In Changzhou City, Jiangsu Province, the People's Republic of China, the underground water has been used for more than 30 years on a large scale. At present, the amount of exploitation of underground water has reached 300,000 m^3 per day. The underground water levels in the main exploited horizons have decreased over a large range with the burial depth being 66-72 metres. Because of the over exploitation of underground water, some environmental problems have occurred.

Since 1980 a series of experiments has been made in the First Changzhou Cotton Mill for three winters. The purified waste water from the mill is chilled during winter and then injected into the main exploited horizons through two irrigating wells. This low temperature water cooled by the winter (ambient air temperature) is stored in the aquifer sand to be used for air-conditioning of the workshops in summer.

The technical process of the artificial recharge is as follows: waste water from the mill ⟶ fibre filter +Cl catchment pool ⟶ impurity filter pump cooling tower ⟶ valveless filter pool +Cl pure water pool pump ⟶ pressure injection into aquifers.

The aquifers are composed of fine, medium and coarse sands. Their burial depths range from 71.6 m to 109.6 m.

According to our statistics, the total volume of waste water from the mill of about 300,000 m^3 was injected into the main exploited horizons in 1980 to 1981. The injected waste water had an average temperature of 12 deg C. When exploited in summer, it had a temperature of 16 deg C, reducing the temperature of the original ground water by 4 deg C. This results in a usable refrigerating capacity about 6.72 TJ or 1.86 GWh and saved electricity of 500 MWh and funds of 60,000 RMB, thus effectively solving

Dans la ville de Changzhou, province du Jiangsu (République populaire de Chine), on exploite la nappe souterraine sur une grande échelle depuis plus de trente ans. Actuellement, la capacité atteint 300 000 m^3 par jour. Les niveaux de la nappe dans les principaux horizons d'exploitation ont baissé (profondeur entre 66 et 72 mètres). Cette surexploitation a entraîné certaines conséquences néfastes sur l'environnement.

Depuis 1980, des essais ont été effectués à la filature de coton de Changzhou au cours de trois hivers. Les eaux usées purifiées de la filature ont été refroidies pendant l'hiver puis injectées dans les principaux horizons d'exploitation au moyen de deux puits d'irrigation. L'eau à basse température refroidie en hiver (température de l'air ambiant) est stockée dans l'aquifère (sable) pour le conditionnement de l'air des ateliers en été.

Le cycle de stockage est le suivant: eaux usées en provenance de la filature ⟶ filtres à fibres +Cl bassin de réception C, ⟶ filtre à impuretés pompe tour de refroidissement ⟶ bassin filtrant sans vanne +Cl bassin d'eau purifiée pompe injection sous pression dans les aquifères.

Les aquifères sont composées de sable fin, moyen et grossier. Leur profondeur varie entre 71.6 m et 109.6 m.

Selon nos statistiques, le volume total d'eaux usées injectées et provenant de la filature s'est élevé à 300 000 m^3 pour 1980 et 1981. Ces eaux avaient une température moyenne de 12 degrés C. Lorsqu'elles étaient traitées en été, la température était de 16 degrés C, soit une réduction de 4 degrés C par rapport à la température originale. La capacité de réfrigération utilisable qui en découle est d'environ 6.72 TJ ou 1.86 GWh; l'économie d'électricité correspond à 500 MWh et l'économie financière à 60 000 RMB, ce qui

the air-conditioning problem of the mill. At the same time, the underground water level had risen 2 metres, and the largest resilient rate of the ground surface reached 12.9 mm in the two year period. This helped to prevent the ground surface from subsiding to a certain extent and achieved remarkable economical and social benefits.

a permis de régler de façon efficace les problèmes reliés au conditionnement de l'air de la filature. De plus, le niveau de la nappe aquifère s'est élevé de deux mètres, et le taux d'élasticité le plus élevé du sol a atteint 12.9 mm sur une période de deux ans. Ainsi, la surface du sol n'a pas subi de tassement jusqu'à un certain point et on a remarqué des avantages importants des points de vue économique et social.

THE FEASIBILITY OF SEASONAL STORAGE OF EXCESS HEAT FOR THE DISTRICT HEATING SYSTEM AT ALMERE

FAISABILITÉ DU STOCKAGE SAISONNIER DE LA CHALEUR EXCÉDENTAIRE DE LA CENTRALE DE CHAUFFAGE URBAIN D'ALMERE

A.L. Snijders and A.A.F. van Woerkom
Heidemij Adviesbureau B.V.
Arnhem, The Netherlands

Project description

The technical and economic feasibility has been investigated of seasonal aquifer thermal energy storage of excess heat. The excess heat will be produced in the summer period by a co-generation plant planned at the city of Almere. The plant will produce electricity for the national grid and will be either a base-load plant of about 26 MW_e or a middle-load plant of about 52 MW_e (in operation 8000 hours and 3600 hours pro year respectively). Both the heat produced during the winter and the stored heat will be used for the already existing district heating network.

Present results

At the moment (end of December 1984) the following results are available:

- The storage should have a thermal loading power of about 21 MW and should preferably be implemented in the primary distribution circuit. Heat is delivered to this circuit in winter after reheating by an auxiliary boiler if necessary.

- The third aquifer (120 - 210 m below ground level) at the future site of the co-generation plant is expected to be suitable for thermal energy storage.

- The amount of heat to be stored is about 245 TJ/year for the base-load plant and about 187 TJ/year for the middle-load plant.

- The calculated storage efficiencies under equilibrium conditions are 81% and 75% respectively, if measures are taken to limit the effect of free convection. A storage temperature of 100°C has an

Description du projet

La faisabilité technique et financière d'un stockage saisonnier de chaleur excédentaire en aquifère a été évaluée. Cette chaleur sera produite pendant l'été par une centrale de cogénération qui doit être construite dans la ville d'Almere. Cette centrale produira de l'électricité pour le réseau national et sera soit une centrale de base d'environ 26 MW_e ou une centrale de charge moyenne d'environ 52 MW_e (en service 8 000 heures et 3 600 heures par année respectivement). La chaleur produite tant en été qu'en hiver sera utilisée pour le réseau de chauffage urbain déjà en place.

Résultats obtenus

À la fin de décembre 1984, les résultats obtenus sont les suivants:

- Le stockage devrait avoir une capacité d'absorption thermique d'environ 21 MW et devrait être, de préférence, raccordé au circuit de distribution primaire. En hiver, la chaleur est restituée à ce circuit après réchauffage par une chaudière auxiliaire au besoin.

- On prévoit que le troisième aquifère (entre 120 et 210 m au-dessous du niveau du sol) du futur emplacement de la centrale de cogénération conviendra au stockage thermique.

- La quantité de chaleur à stocker est de 245 TJ/an pour la centrale de base et d'environ 187 TJ/an pour la centrale à charge moyenne.

- Le rendement calculé du stockage dans des conditions d'équilibre est respectivement de 81 % et 75 %, à condition que des mesures soient prises pour limiter la convection naturelle. Un stockage dont

- efficiency which is hardly higher than that of 90°C.

- The saving of primary energy is depending both on the conversion efficiency of an auxiliary boiler and that of a reference electricity plant. For the case with the base-load plant the saving will be 200 to 260 TJ/year and for the middle-load plant 140 to 180 TJ/year.

- Groundwater treatment is necessary to prevent precipitation of calcium carbonate and possibly iron hydroxide. This water treatment will increase the chloride concentration of the groundwater and may have adverse effects on the environment.

- Realisation of the aquifer heat store requires an investment of about DFL 12.0 million (about U$ 3.3 million), including the costs of a detailed geohydrological survey, engineering and supervision.

- The economic evaluation of the store in combination with the base-load plant shows that the net cash value of the project amounts to DFL 8.3 million (guilders of the year 1984, evaluation period 15 years).

Future work

Recently it has been decided to build a 52 MW_e middle-load plant at Almere. The economic evaluation of the store in combination with this plant will be finished before February 1985. If this also is an attractive option from the economic point of view, a detailed geohydrological survey (including pumping tests) probably will be carried out in the springtime to verify the actual geohydrological and geochemical situation.

la température est maintenu à 100 °C a un rendement à peine supérieur à celui qu'il aurait à 90 °C.

- Les économies d'énergie primaire dépendent à la fois du rendement de conversion d'une chaudière auxiliaire et de celui d'une centrale électrique de référence. Ces économies seront de 200 à 260 TJ/an dans le cas de la centrale de base, et de 140 à 180 TJ/an avec la centrale à charge moyenne.

- Le traitement de l'eau du sol est nécessaire pour éviter la précipitation de carbonate de calcium et possiblement d'hydroxyde de fer. Le traitement de l'eau augmentera la teneur en chlorures de l'eau souterraine et peut être nuisible pour l'environnement.

- La réalisation du stockage en aquifère exige un investissement d'environ 12.0 millions DFL (environ 3.3 millions de dollars américains), en comptant les coûts d'une étude hydrogéologique détaillée, des travaux d'ingénierie et la surveillance.

- L'évaluation financière du stockage en combinaison avec la centrale de base indique que la valeur nette du projet s'élève à 8.3 millions DFL (en florins de 1984, période d'évaluation de 15 ans).

Travaux prévus

Il a été décidé récemment de construire une centrale à charge moyenne de 52 MW_e à Almere. L'évaluation financière du stockage relié à cette centrale devait être complétée en février 1985. Si ce projet est attrayant du point de vue économique, une analyse hydrogéologique détaillée (comprenant des essais de pompage) sera probablement effectuée au printemps pour vérifier les conditions géohydrologiques et géochimiques réelles.

GROUNDWATER HEAT PUMPS IN COMBINATION WITH LOW-TEMPERATURE "NATURAL" HEAT SOURCES. ECONOMICAL AND TECHNICAL ASPECTS

POMPES À CHALEUR À EAU SOUTERRAINE UTILISANT DES SOURCES DE CHALEUR "NATURELLES" À BASSE TEMPÉRATURE. ASPECTS FINANCIERS ET TECHNIQUES

S.N. Sorensen, H. Olsen, B. Qvale
Technical University of Denmark
Lyngby, Denmark

The economics of the groundwater heat pump used for single- and double-family houses depends strongly on the cost of establishing a reliable heat source. Conventionally, such heat pumps extract water from the ground through one well and reinject it through a second at some distance. The establishment of these wells usually represent the costliest item in the budget.

By using one well for both extraction and reinjection at different depths the associated expenses may be reduced by fifty percent. In order to avoid short circuiting the system with the result of extracting cold water from the "warm" well, the cold well has to be regenerated. This may be done by using low-temperature solar heat, surface water from lakes or ocean, or heat from the air. The results of optimization studies of the technical and economic performance of selected systems are described.

Furthermore, a test plant that has been established for general studies of the properties of ground water heat pumps is described.

Finally, the first experiences with this plant and results of the first recharging attempts are presented.

Les économies réalisables par une pompe à chaleur à eau souterraine desservant des habitations à un ou deux logements dépendent en grande partie du coût d'établissement d'une source de chaleur fiable. Généralement, ces pompes à chaleur extraient de l'eau d'un puits et la réinjectent dans un autre situé à une certaine distance. La construction de ces puits constitue habituellement l'élément le plus important du budget des dépenses.

Il est possible de réduire de moitié ces coûts de construction en extrayant et en réinjectant l'eau dans un même puits, mais à des profondeurs différentes. Pour éviter que l'installation soit court-circuitée, ce qui causerait l'extraction d'eau froide du puits "chaud", il faut régénérer le puits froid. Pour ce faire, on peut utiliser de la chaleur solaire à basse température, l'eau de surface d'un lac ou d'un océan ou la chaleur de l'air. Le présent document décrit les résultats des études d'optimisation du rendement technique et financier des systèmes choisis.

Le document contient aussi une description d'une centrale d'essai construite pour les analyses générales des propriétés des pompes à chaleur à eau souterraine.

Enfin, les premières expériences avec cette centrale ainsi que les résultats des premières tentatives de stockage sont commentées.

ECONOMICAL EFFECT OF THE INTRODUCTION OF AQUIFER COLD PRESERVATION FOR AIR-CONDITIONING AND TEMPERATURE LOWERING OF SHANGHAI HONGQIAO AIRPORT

EFFET ÉCONOMIQUE DE LA CONSERVATION DU FROID EN AQUIFÈRE POUR LE CONDITIONNEMENT DE L'AIR ET L'ABAISSEMENT DE LA TEMPÉRATURE À L'AÉROPORT HONGQIAO DE SHANGHAI

Sun Yung-Fu, Su He-yuan
Geological Center of Shanghai
Economical Zone
Shanghai, People's Republic of China

In view of the development of aquifer energy storage, this paper gives a systematic presentation of aquifer cold preservation contrived to air-conditioning the air-lounge of Shanghai Hong Qiao Airport. This contrivence, as compared with other refrigerator, has far more advantages such as economy of investment, low consumption of power and coal, low running cost, convenience of management. Accordingly, aquifer energy storage is proved a good supply of cold and heat for the adjustment of temperature in buildings. This development further displays its high economical effect in the industrial production.

Ce document présente, dans le cadre du développement du stockage de l'énergie en aquifère, une installation conçue pour le conditionnement de l'air de la salle d'attente de l'aéroport Hong Qiao de Shanghai. Comparée à d'autres types d'installations de refroidissement, celle-ci offre plus d'avantages: frais d'investissement réduits, faible consommation d'électricité et de charbon, faible coût d'exploitation, plus grande facilité de gestion. Ainsi, le stockage en aquifère s'est révélé une bonne source de froid et de chaleur pour maintenir des conditions de confort dans les bâtiments. Cette nouvelle technique démontre l'énorme potentiel d'économies réalisables au niveau de la production industrielle.

MONITORING OF HOT WATER PLUME MOVEMENTS IN AN AQUIFER WITH BOREHOLE/SURFACE RESISTIVITY MEASUREMENTS

ENREGISTREMENT DES MOUVEMENTS DU PANACHE D'EAU CHAUDE DANS UNE NAPPE AQUIFÈRE PAR MESURE DE LA RÉSISTIVITÉ EN SURFACE ET DANS DES TROUS DE FORAGE

Chin-Fu Tsang and Michael J. Wilt
Lawrence Berkeley Laboratory
Berkeley, U.S.A.

In the storage of hot water in aquifers for later use, it is important to know the position of the hot water plume during the period of storage and retrieval. This is particularly important in aquifers which have a significant regional flow or which are strongly influenced by ground surface conditions such as rainfall and seasonal temperature variations.

The present paper proposes the use of surface resistivity measurements coupled with downhole electrodes at the level of the aquifer to provide economical, continuous monitoring of the hot water plume movements. Calculations were performed to show the feasibility of the concept and the expected magnitudes of resistivity measurements for a number of cases.

A three-dimensional resistivity model developed at Berkeley was used to study the changes in resistivity due to the introduction and movements of a hot water plume at 80°C in an aquifer 25m thick and 45m below the ground surface. The plume is assumed to be 30 m in radius around an injection well. Because of the difference in the storage temperature and the initial aquifer temperature of 20°C, there is a resistivity contrast of about 2.3. Potentials were calculated for an arbitrary three-dimensional resistivity distribution with surface downhole current and potential electrodes. A downhole/surface array arrangement was studied where current was injected at the aquifer depth and voltage measurements were made on the surface. We considered cases where current was injected at a point within the hot water plume as well as outside of the plume (offset case). Three plume distributions were assumed; case 1, the plume forms a uniform cylinder centered around the injection well; case 2, the plume forms a diffused cylinder around the well where temperature decreases away from the

Lorsqu'on stocke de l'eau chaude en aquifère pour une utilisation ultérieure, il est important de connaître la position du panache d'eau chaude au cours de la période de stockage et de pompage. Ceci est particulièrement important dans les nappes qui ont un écoulement local important ou sont fortement influencées par l'air ou l'eau en surface (pluies ou variations de température saisonnières).

Ce document propose de mesurer la résistivité en surface et à l'aide d'électrodes introduites par forage au niveau de l'aquifère, ce qui permet d'enregistrer de façon économique et continue les mouvements du panache d'eau chaude. Les calculs ont pour but d'étudier la faisabilité du concept et l'ordre de grandeur des mesures de la résistivité auquel on peut s'attendre dans un certain nombre de cas.

Un modèle de résistivité tridimensionnel mis au point à Berkeley a été utilisé pour analyser les changements de résistivité dus à l'injection et aux déplacements d'un panache d'eau à 80 °C dans un aquifère de 25 m d'épaisseur et situé à 45 m de profondeur. On suppose que le panache a un rayon de 30 m autour du puits d'injection. À cause de la différence entre la température de stockage et la température initiale de l'aquifère, c'est-à-dire 20 °C, il existe une variation de résistivité d'environ 2,3. Les équipotentielles sont calculées pour une distribution tridimentionnelle arbitraire de la résistivité à l'aide d'un courant entre la surface et le sous-sol et d'électrodes de mesure de la tension. On a étudié un réseau de mesure dans lequel on a introduit un courant à la profondeur de l'aquifère et on a mesuré la tension en surface. Les deux cas suivants ont été étudiés: le courant est émis en un point à l'intérieur du panache d'eau chaude et à l'extérieur de celui-ci. Trois types de panaches d'eau chaude ont été envisagés; cas 1, panache d'eau chaude en forme de cylindre régulier axé selon le puits

well; case 3, the aquifer has a variable vertical permeability. Results indicate that the resistivity anomaly is much greater using the downhole electrode than for surface arrays without downhole electrodes and that the data may be used to roughly characterize the hot water plume and its boundaries. The downhole/surface measurements are not found to be very sensitive to differences in the boundary geometry and diffuseness. Calculated resistivity changes as the hot water plume moves away from the downhole electrode show clear characteristic observable variations, thus demonstrating the capability of the method to monitor hot water plume movements in an aquifer.

d'injection; cas 2, panache d'eau chaude en forme de cylindre diffus autour du puits d'injection et dont la température diminue en s'éloignant du puits; cas 3, aquifère dont la perméabilité varie verticalement. Les résultats indiquent que les variations de résistivité sont plus grandes avec la méthode de mesure par électrodes dans le sous-sol qu'avec le réseau de mesure de surface sans électrode dans l'aquifère. Les résultats peuvent donner les caractéristiques approximatives du panache d'eau chaude et ses limites. Les mesures effectuées en surface ainsi que les mesures dans l'aquifère ne sont pas très sensibles aux différences de géométrie et de diffusion. Les variations de résistivité calculées lorsque le panache d'eau chaude s'éloigne des électrodes montrent que les caractéristiques du panache sont observables et qu'il est possible de mesurer ses déplacements dans l'aquifère.

A COMPUTER CODE FOR ANALYZING THE PERFORMANCE OF AQUIFER THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS

UN CODE INFORMATIQUE POUR ANALYSER LE RENDEMENT DES INSTALLATIONS DE STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE DANS LES AQUIFÈRES

L.W. Vail, L.D. Kannberg and C.T. Kincaid
Pacific Northwest Laboratory
Richland, U.S.A.

The Underground Energy Storage Program investigates the performance of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) systems. This program is managed by Pacific Northwest Laboratory (PNL) for the U.S. Department of Energy. To aid the analysis of ATES systems, PNL developed a suite of computer codes, ranging from complex three-dimensional geohydrological models to economic models of ATES systems. Recently PNL developed a code called Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator (ATESSS) to analyze the operational performance of ATES systems.

Le programme de stockage d'énergie souterraine porte sur le rendement du stockage d'énergie thermique dans les aquifères (ATES). Ce programme est dirigé par Pacific Northwest Laboratory (PNL) pour le ministère de l'Énergie des États-Unis. Pour aider à la conception des installations ATES, PNL a développé une série de programmes informatiques, allant des modèles géohydrologiques complexes à trois dimensions aux modèles économiques d'ATES. Récemment PNL a développé un programme appelé "Aquifer Thermal Energy Storage System Simulator" (ATESSS) pour étudier le rendement des ATES.

Engineering design judgement generally develops with experience on similar projects. Since only a few experimental ATES facilities exist in the world today, there is little experience on which to base the engineering design of ATES systems. The choice of design specifications (e.g., well field layout and heat exchanger sizing) and operational strategies (e.g., pumping/injection schedule) are complicated by unpredictable variations in the demand for thermal energy and the availability of the heat source. Simple simulation models are an inexpensive way to augment the experience base provided by field experiments and demonstration projects.

La conception technique de ces installations s'est développé en général avec l'expérience acquise sur des projets similaires. Comme il y a peu d'installations expérimentales ATES actuellement dans le monde, l'expérience est limitée. Le choix des caractéristiques de conception (c.-à-d. emplacement des puits et dimensionnement de l'échangeur de chaleur) et les stratégies de fonctionnement (pompage/injection) se compliquent par des variations imprévisibles de la demande d'énergie thermique et de la disponibilité de la source de chaleur. Les modèles de simulation simples sont peu onéreux et permettent de compléter les connaissances provenant d'expériences en vraie grandeur et de projets de démonstration.

ATESSS is a simulator of ATES systems. It is a user friendly model designed to be run interactively on mini or personal computers. The model considers heat transport in the aquifer, overburden and basement formations, and surface heat exchanger performance. Additionally, stochastic generators for system inputs and outputs are available.

L'ATESSS est un programme de simulation d'une installation ATES. Il s'agit d'un modèle d'accès facile prévu pour fonctionner sur des ordinateurs personnels ou des mini-ordinateurs. Le modèle tient compte des transferts de chaleur dans l'aquifère, des formations du sous-sol et des échanges thermiques en surface. De plus, des générateurs de variables aléatoires sont disponibles pour les données et les résultats.

ATESSS has been used to simulate the effect of different pumping/injection schedules on the system performance of several ATES

Le programme ATESSS a été employé pour étudier l'effet de différents horaires de pompage et d'injection sur le rendement de

systems including the St. Paul, Minnesota, field experiment. The results of these simulations show that the reliable yield of an ATES system can be influenced as much by operational policies as the aquifer's thermal properties.

plusieurs installations ATES, y compris celle de St. Paul, Minnesota. Les résultats de ces simulations montrent que la fiabilité d'une installation ATES est due autant à des stratégies de fonctionnement qu'aux caractéristiques thermiques de l'aquifère.

HEATING OF AN OFFICE BUILDING USING SOLAR ENERGY IN COMBINATION WITH A HEAT PUMP AND SEASONAL HEAT STORAGE

CHAUFFAGE D'UN ÉDIFICE À BUREAUX PAR SYSTÈME SOLAIRE, POMPE À CHALEUR ET STOCKAGE DE CHALEUR SAISONNIER

R.J.A. van der Bruggen
Bredero Energy Systems B.V., Bunnik, The Netherlands
A.L. Snijders
Heidemij. Adviesbureau B.V., Arnhem, The Netherlands

Description of the project

In Bunnik, a large newly built office-building (total floor area of approximately 10,000 m2) is heated by a system consisting of 450 m2 low temperature, single glazed solar collectors, a gas driven heat pump and a seasonal heat storage system in an aquifer with a width of 30,000 m3 water.

During the summer period, heat from the solar collectors (temperature level approximately 25°C) and from the cooling equipment of the computer department (temperature level about 35°C) is stored in the aquifer. During spring and autumn, the heat from the collectors and the cooling unit is used directly for space heating.

To reach the temperature level necessary for space heating, a gas driven heat pump is applied.

During the winter period, heat from the aquifer storage system is recovered for space heating by means of a heat pump. If necessary, additional heating is provided by a high efficiency gas boiler.

Status of the project

The seasonal heat storage and the heat pump system have been installed and are being tested at the moment. Heat supplied by the gas boilers is injected during this test stage and the performance of the storage system is monitored. Furthermore, investigations on chemical and microbiological effects of subsurface heat storage are carried out.

The solar collectors are planned to be installed in March of 1985, so that during spring and early summer of 1985 the first experimental data will be available.

À Bunnik, un important édifice à bureaux récemment construit (aire de plancher totale d'environ 10 000 m^2) est chauffé à l'aide d'une installation comprenant 450 m^2 de capteurs solaires à simple vitrage à basse température, une pompe à chaleur entraînée par une turbine à gaz et un stockage de chaleur saisonnier dans un aquifère de 30 000 m^3.

Au cours de l'été, la chaleur des capteurs solaires (température d'environ 25 °C) et l'équipement de refroidissement des salles d'ordinateurs (température d'environ 35 °C) est stockée dans l'aquifère. Au cours du printemps et de l'automne, cette chaleur est utilisée directement pour le chauffage des locaux.

Pour atteindre la température nécessaire on utilise une pompe à chaleur entraînée par une turbine à gaz.

Au cours de l'hiver, la chaleur de l'aquifère est récupérée pour le chauffage au moyen de la pompe à chaleur. Au besoin, un chauffage d'appoint est fourni par une chaudière à gaz à haut rendement.

État d'avancement du projet

Le stockage saisonnier de chaleur et la pompe à chaleur sont actuellement à l'essai. La chaleur fournie par la chaudière à gaz est injectée au cours de cette période d'essai et le rendement du stockage est ensuite enregistré. D'autres études sur les effets chimiques et microbiologiques du stockage de chaleur dans le sol sont effectuées en même temps.

Les capteurs solaires devraient être normalement installés en mars 1985 de sorte qu'on puisse obtenir les premières données expérimentales au printemps ou au début de l'été de cette année.

Technical Data

The total annual heat demand of the well insulated building, including ventilation, is calculated to be 660 MWh_{th}/a.
Calculations have shown that from this heat depand, 585 MWh_{th}/a is supplied by the heat pump, and 75 MWh_{th}/a is required as additional heating. From solar collectors and cooling equipment, 310 MWh_{th}/a is stored in the aquifer, while 65 MWh_{th}/a is directly supplied to the evaporator side of the heat pump. From the 310 MWh_{th}/a which is injected in the aquifer storage, 246 MWh_{th}/a can be recovered and supplied to the heat pump. The thermal power of the heat pump is approximately 200 kW_{th}.

Données techniques

Le besoin annuel de chauffage du bâtiment bien isolé thermiquement, y compris pour la ventilation, est estimée d'après les calculs à 660 MWh_{th}/a. Selon les calculs, 585 MWh_{th}/a devraient être fournis par la pompe à chaleur et 75 MWh_{th}/a par le chauffage d'appoint. 310 MWh_{th}/a provenant des capteurs solaires et de la climatisation sont stockés dans l'aquifère tandis que 65 MWh_{th}/a sont directement utilisés par l'évaporateur de la pompe à chaleur. Des 310 MWh_{th}/a qui sont injectés dans l'aquifère, 246 MWh_{th}/a peuvent être récupérés par la pompe à chaleur. La puissance thermique de la pompe à chaleur est d'environ 200 kW_{th}.

ANALYSIS OF AIR-CONDITIONING SYSTEM WITH CHILLED WATER STORAGE IN AQUIFER

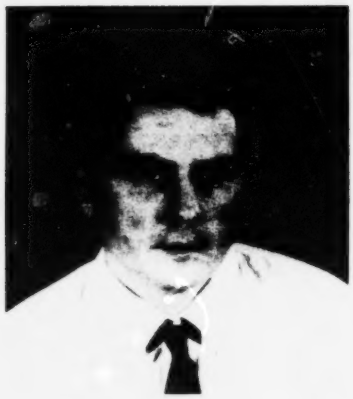
ANALYSE D'UNE INSTALLATION DE CONDITIONNEMENT D'AIR AVEC STOCKAGE D'EAU REFROIDIE EN AQUIFÈRE

Zhao Baizhong
Northeast University of Technology, Shenyang, People's Republic of China
Zhao Rongyi
Tsinghua University, Beijing, People's Republic of China

The optimal performance of air-conditioning system with chilled-water storage in aquifer (ACCWSA system in short) is investigated in this paper. The ACCWSA system consists of four subsystems: general air-conditioning system (AC system in short), reheat system, chilled-water system, water cooling system. Because outdoor air temperature is varied with time, cooling load demanded by conditioned spaces is variable, too. By analysing those subsystems, equations that describe the subsystems are set up. An objective function, z, is employed to determine the optimal conditions of the system. Calculating ways are discussed. Finally, calculation of a practical project is carried out.

Ce document porte sur l'étude du rendement optimal d'une installation de conditionnement d'air avec stockage d'eau refroidie en aquifère. L'installation comprend quatre sous-ensembles: une installation générale de conditionnement d'air, une installation de refroidissement de l'eau. La charge de refroidissement des locaux conditionnés varie selon la température de l'air extérieur qui elle aussi est variable. Des équations sont utilisées aux fins d'analyse des sous-systèmes. Une fonction objective, z, sert à déterminer les conditions optimales du système. Des méthodes de calcul ainsi qu'un modèle pratique sont présentés

DUCT/ CONDUITS



Otto Svec, Diplom Eng., Ph.D.
Division of Building Research
National Research Council of Canada
Ottawa, Canada

Soren Andersson, Ph.D.
Energy and Process
AIB Consulting Engineers
Solna, Sweden

UNDERGROUND HEAT STORAGE IN FRANCE PRESENT STAGE OF DEVELOPMENT AND FUTURE PROSPECTS

LES FILIERÈS DE STOCKAGE THERMIQUE SOUTERRAIN EN FRANCE-ÉTAT ACTUEL DE DÉVELOPPEMENT ET PERSPECTIVES

Yves Boileau and Raymond Ferrande
AFME - Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie
Jean-Pierre Marie, PCH - Plan Construction et Habitat
Paris, France

Interest in long-term heat storage techniques started to develop in France during the past decade. Most non-traditional sources of heat energy, whether available year-round (incineration of waste, industrial waste, etc.) or seasonally (solar heat, heat rejected by air-conditioning systems in summer, etc.), rarely output their energy in phase with the heating requirements that they could potentially satisfy.

For this reason, a significant research and exploratory development effort is underway to explore heat storage techniques aimed at a more rational and economical use of available energy. The Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie (French Agency for Energy Management) and various public organizations (PCH, BRGM, École des Mines, CSTB, CNRS, etc.) have completed a broad spectrum of studies and pilot projects in this area.

Some key data on energy demand in France are first presented to set the stage for a brief overview of the above-mentioned work.

L'intérêt pour les dispositifs destinés à stocker la chaleur sur de longues périodes a commencé à se manifester en France au cours de la dernière décennie. La plupart des sources d'énergie non traditionnelles, qu'elles soient produites "au fil de l'eau" (combustion des déchets, chaleurs industrielles, ...), ou très saisonnières (chaleur solaire, rejets chauds de climatisation d'été, ...) sont rarement en phase avec les besoins de chauffage qu'elles pourraient satisfaire.

Partant de ce constat, et dans la perspective d'un usage plus rationnel et plus économe des énergies, un important effort de recherche et d'expérimentation est engagé pour explorer les filières techniques de stockage de la chaleur. L'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie et divers organismes publics (PCH, BRGM, École des Mines, CSTB, CNRS, ...), ont réalisé un large éventail d'études et de réalisations exemplaires en ce domaine.

Un panorama rapide en est présenté, après l'exposé de quelques données-clés du contexte énergétique français.

REVIEW AND FINDINGS OF THE SECOND EC-IEA WORKSHOP ON SOLAR ASSISTED HEATPUMP SYSTEMS WITH GROUND COUPLED STORAGE

REVUE ET CONCLUSIONS DU DEUXIÈME ATELIER CE-AIE SUR LES POMPES À CHALEUR FAISANT APPEL À L'ÉNERGIE SOLAIRE ET AU STOCKAGE SOUTERRAIN

M. Catan, Brookhaven National Laboratories, New York, U.S.A.
J. Dalenback, Chalmers University of Technology, Gothenborg, Sweden
D. van Hattem, Comm. of the European Communities, JRC, Ispra, Italy

This paper gives an overview of the Second Workshop on Solar Assisted Heatpumps with ground Coupled Storage, held in Vienna in May 1985. Tables with the key parameters and results of the presented systems are included.

The main conclusions of the workshop are, that there is, to certain extent, a consensus about the most promising lay-outs for such systems for certain applications and that the systems seem to be cost effective in a number of cases with special conditions.

Ce document présente un aperçu du deuxième atelier sur les pompes à chaleur faisant appel à l'énergie solaire et au stockage souterrain, qui a eu lieu à Vienne en 1985. On y trouve aussi des tableaux illustrant les variables et les résultats principaux des systèmes présentés.

Dans une certaine mesure, l'atelier a permis de dégager un consensus sur les types de systèmes les plus prometteurs dans certaines applications ainsi que sur la rentabilité de ces mêmes systèmes dans des conditions particulières.

THERMAL ENERGY STORAGE PROGRAMME IN SWEDEN

PROGRAMME SUÉDOIS DE STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE

Sven-Erik Lundin
Swedish Council for Building Research
Stockholm, Sweden

The Swedish energy policy of the last 10 years has had as its main goal the reduction of the country's dependence on oil through the increased use of renewable domestic energy sources such as solid fuels and hydro electricity. In step with the closing down of nuclear power plants in the period up to 2010, new energy sources and technologies such as heat pumps, waste heat, natural heat and solar energy will be developed and introduced. At the same time the energy consumption in the building sector will be reduced from 120 TWh in 1978 to 80 TWh by 1988.

Au cours des dix dernières années, la politique énergétique de la Suède a surtout été axée sur une utilisation accrue des énergies domestiques renouvelables comme les combustibles solides et l'énergie hydroélectrique dans le but de réduire la dépendance pétrolière du pays. Des technologies et sources d'énergie nouvelles telles les pompes à chaleur, la récupération thermique, la chaleur naturelle et l'énergie solaire vont être développées et mises en service et on prévoit la fermeture de centrales nucléaires jusqu'en 2010. La consommation énergétique dans le secteur du bâtiment devra passer de 120 TWh en 1978 à 80 TWh en 1988.

Energy research is crucial in obtaining these goals. Technical, administrative and economic efforts are being implemented over periods of three years as part of a coordinated national research program. New technology has been developed and tested in full scale for energy conservation, heat pumps, solar energy and energy storage systems. The research activities have been carried out on a broad scale within the sector from basic R&D, competence raising and pre-studies, to full scale construction and support to industry. R&D-policy has also been concentrated on system studies, and interdisciplinary cooperation between researchers, consultants, industry and energy consumers.

La recherche dans le domaine énergétique est cruciale pour la réalisation de ces objectifs. Des efforts dans les domaines technique, administratif et économique sont mis en oeuvre sur des périodes de trois ans dans le cadre d'un programme national de recherche. De nouvelles technologies ont été élaborées et mises à l'essai en vraie grandeur dans le domaine de l'économie de l'énergie, des pompes à chaleur, de l'énergie solaire et du stockage. La recherche effectuée prend diverses formes, des programmes de base en R & D et des études préliminaires, à la construction en vraie grandeur et au soutien à l'industrie. La politique en matière de R & D a aussi été axée sur les études de systèmes et sur la collaboration entre chercheurs, experts-conseils et consommateurs d'énergie et de produits industriels.

Heat storage can utilize the energy from seasonal energy sources such as solar heat, waste heat and natural heat (air, water). Short-term stores are more useful in direct heat production for peak shaving in plants using solid fuels, co-generation and refuse-burning. The role of storage is a system question which also has to consider the municipal energy situation, consumers'

Le stockage thermique peut utiliser l'énergie provenant de sources saisonnières telles la chaleur solaire, la chaleur récupérée et la chaleur naturelle (air, eau). Les stockages à court terme sont plus utiles pour la production directe de chaleur en vue d'écréter les pointes dans les centrales utilisant des combustibles solides, la cogénération et la combustion de déchets.

heating demand, existing production equipment and competing technologies such as oil and electricity.

Seasonal storage of heat seems to have the most favorable conditions in the ground and directly in the geological deposits of soil and rock. Work carried out in the field of subsurface storage has, since 1979, resulted in the construction of a large number of research and pilot-plants in order to test the following techniques in full scale:

- Storage in water (rock-caverns, pits, mines)
- Storage in ground (boreholes in rock, tubes in clay and peat)
- Storage in aquifers (ground water magazins in soil and rock).

Research funds of about SEK 40 millions have been invested in this field since 1979 and a further 15 full scale projects have been financed by special experimental building loans of SEK 50 millions.

Results and experience over the last five years show that we now, both in theory and practice, have the essential technical expertise on seasonal storage on a large scale. A market introduction has just been started and will depend on the economic climate, existing heating systems adaptation, competing energy technologies and environmental improvement considerations.

Research during the period 1984-87 will concentrate on evaluating full scale projects and on system studies dealing with the integration of heat stores in heating systems. In order to develop inexpensive construction methods and for demonstration purposes, Sweden will build several full scale stores in the second and third generations. By 1987 heat storage technologies will have reached a satisfactory technical level and will probably become economically viable.

Pour déterminer le rôle du stockage, il faut tenir compte de la situation énergétique municipale, des besoins en chauffage des consommateurs, du matériel de production existant et des sources concurrentes telles le pétrole et l'électricité.

Le stockage saisonnier de la chaleur sous terre et directement dans les couches géologiques de sol et de roc semble offrir les conditions les plus favorables. Les travaux dans le domaine du stockage souterrain ont, depuis 1979, entraîné la réalisation d'un grand nombre de projets de recherche et de projets-pilotes permettant l'évaluation des techniques suivantes sur une plus grande échelle:

- Stockage hydraulique (cavités rocheuses, puits, mines)
- Stockage souterrain (forages dans le roc, tubes dans l'argile et la tourbe)
- Stockage en aquifère (nappes d'eau souterraine dans le sol et le roc).

Depuis 1979, on a consacré environ 40 millions de SEK à la recherche dans le domaine et environ 15 projets en vraie grandeur ont été financés par des prêts spéciaux totalisant 50 millions de SEK.

Les résultats des recherches et l'expérience acquise au cours des cinq dernières années ont démontré que nous disposons de l'expertise technique théorique et pratique essentielle en matière de stockage saisonnier à grande échelle. Nous venons d'effectuer une percée sur le marché et les débouchés seront fonction du climat économique, de l'adaptation des installations de chauffage existantes, des technologies concurrentes et des considérations relatives à l'amélioration de l'environnement.

Les recherches pour la période 1984 à 1987 porteront surtout sur l'évaluation de projets en vraie grandeur et sur l'étude de l'intégration des stockages de chaleur aux installations de chauffage. On construira en Suède plusieurs stockages en vraie grandeur de la deuxième et troisième génération à des fins de démonstration et pour mettre au point des techniques de construction peu coûteuses. D'ici 1987, les technologies dans le domaine du stockage thermique auront atteint un niveau satisfaisant et deviendront probablement économiquement viables.

GROUND HEAT STORAGE TECHNOLOGY IN SWEDEN

STOCKAGE THERMIQUE SOUTERRAIN EN SUÈDE

Sören Andersson
AIB Consulting Engineers
Solna, Sweden

Ground Heat Storage in Sweden normally refers to heat storage in rock, clay or peat. Bedrock suitable for different concepts of bore hole heat stores is accessible in most parts of the country, whereas clay and peat in settled areas are concentrated in specific regions.

A number of ground heat storage projects have been implemented during the last years in rock as well as in clay and peat. The projects are in different stages of follow up and evaluation. Other projects are planned or under design.

The paper deals with technical solutions, environmental aspects, economy and potential for the different storage concepts.

En Suède, le stockage thermique souterrain est généralement réalisé dans le roc, l'argile ou la tourbe. Dans la plupart des régions du pays, le roc se prête bien aux divers types de stockages thermiques par forages, alors que l'argile et la tourbe sont concentrées dans certaines régions.

Au cours des dernières années, plusieurs projets de stockage souterrain dans le roc ainsi que dans l'argile et la tourbe ont été mis en oeuvre. Certains projets en sont à divers stades de suivi et d'évaluation mais d'autres n'en sont qu'à l'étape de la planification ou de la conception.

Ce document porte sur les solutions techniques, les aspects écologiques et économiques et le potentiel des différents systèmes de stockage.

SOIL AIR AS A HEAT SOURCE FOR DOMESTIC HEATING BY HEAT PUMPS

UTILISATION DE L'AIR DU SOUS-SOL COMME SOURCE DE CHALEUR POUR LES POMPES À CHALEUR DE CHAUFFAGE RÉSIDENTIEL

Sören Andersson, Anders Eriksson and Hannes Schmied
AIB Consulting Engineers
Solna, Sweden

To reduce peak demands of electricity for outdoor-air heat pumps, soil air as a heat source for heat pumps has been studied.

In some areas of Sweden, large volumes of gravel and sand with ground water levels below 5-15 m from land surface offer possibilities to extract soil air from shallow wells. The soil air has a temperature corresponding to groundwater temperature or to the yearly mean air-temperature for the place in question.

A practical test with an air well (diameter 1 m, depth 4 m) in an esker has shown that air can be extracted at a flow rate of 0.23 m^3/s (800 m^3/h) and at a temperature of approximately 5°C during the whole winter.

By air pressure measurements it has been possible to deduce that the well withdraws soil air from an area of at least 60 m radius from the well. Economical calculations show that the low cost of electricity in Sweden today makes supplementary resistance heating more economical than an investment in an air well for withdrawal of soil air.

The well mentioned above was built in order to develop a method to reduce soil radon infiltration in one-family houses situated on the esker. When serving double purposes, it will be economical to use the soil air for a heat pump of one of the houses.

Afin de réduire la consommation d'électricité de pointe des pompes à chaleur utilisant l'air extérieur comme source chaude, on étudie les possibilités d'utilisation de l'air du sous-sol comme source de chaleur.

Dans certaines régions de la Suède, d'importants volumes de gravier et de sable avec une nappe phréatique située à au moins 5 à 15 m sous le niveau du sol offrent des possibilités d'extraction d'air du sous-sol par des puits peu profonds. Cet air a une température proche de celle de l'eau souterraine ou de la température annuelle moyenne de l'air pour la région.

Un essai pratique avec un puits d'air (1 m de diamètre, 4 m de profondeur) dans un esker a prouvé qu'on peut obtenir un débit de 0.23 m^3/s (800 m^3/h) à une température d'environ 5 °C pendant tout l'hiver.

Par des mesures de la pression d'air on a pu déduire que le puits permet d'extraire l'air situé dans un rayon de 60 m. Les calculs indiquent qu'en raison du faible coût de l'électricité en Suède, un chauffage d'appoint par résistances électriques est plus économique qu'un puits d'extraction d'air du sous-sol.

Le puits en question avait été construit dans le but de mettre au point une méthode pour réduire les infiltrations de radon du sol dans des maisons unifamiliales situées sur l'esker. Si le puits a ce double usage, il sera rentable d'utiliser l'air du sous-sol pour la pompe à chaleur de l'une des maisons.

EXPERIMENTAL STUDY OF TRANSFERS OF MASS AND ENERGY ABOVE A HEAT STORAGE IN UNSATURATED SOIL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES TRANSFERTS DE MASSE ET D'ÉNERGIE AU-DESSUS D'UN STOCKAGE DE CHALEUR EN SOL NON SATURÉ

J.C. Bénet, C. Saix, P. Jouanna
Université des Sciences et Techniques du Languedoc
Montpellier, France

The purpose of the physical model was the experimental study of the unsaturated layer of soil overlying a solar energy earth storage facility.

The large-scale physical model consisted of a storage zone and a layer of unsaturated soil. The storage zone was simulated by a concrete tank containing saturated sand. The temperature of the tank was regulated to simulate heat storage. The layer of unsaturated soil 3 m thick was placed on top of the tank. Sensors installed vertically in this layer allowed us to follow changes in it with time. These sensors provided access to the temperature profiles, water content, total pressure of the gas phase, partial pressure of water vapour, capillary suction, compaction and thermal conductivity in the unsaturated soil layer.

Throughout the eight-month test program, we simulated energy storage at 60°C. The surface of the soil was subjected to controlled conditions and then to natural atmospheric conditions.

The measurements taken during the test program were interpreted on two levels:

- direct interpretation by analysis of the changes caused by the storage and calculation of mass and energy flows;
- validation of a mathematical model.

It was noticed that the storage did not affect water equilibrium in the soil. No overpressure of the gaseous phase or significant compaction was recorded. The only two parameters changed by the storage were temperature and partial pressure of water. Atmospheric conditions were felt only in a superficial layer about 70 cm thick and did not affect the storage yield. The flow calculations show that vertical transfers of

Le but du modèle physique est l'étude expérimentale de la couche de sol non-saturé située au-dessus d'une stockage d'énergie solaire dans un sol.

Le modèle physique de grande taille est constitué d'une zone de stockage et d'une couche de sol non-saturé. La zone de stockage a été simulée par un bac en béton contenant un sable saturé. La température du bac a été régulée pour simuler un stockage de chaleur. La couche de sol non-saturé de 3 m d'épaisseur a été mise en place au-dessus du bac. Des capteurs installés sur une verticale dans cette couche permettent de suivre son évolution dans le temps. Ces capteurs donnent accès aux profils de température, teneur en eau, pression totale de la phase gazeuse, pression partielle de la vapeur d'eau, succion capillaire, tassement et conductivité thermique dans la couche de sol non-saturé.

Au cours du programme d'essai d'une durée de huit mois, on a simulé un stockage d'énergie à 60 °C. La surface du sol a été soumise à des conditions contrôlées puis aux conditions atmosphériques naturelles.

Les mesures réalisées au cours du programme d'essai ont été interprétées à deux niveaux:

- interprétation directe par analyse des modifications engendrées par le stockage et calcul des flux de masse et d'énergie;
- validation d'un modèle mathématique.

On constate que le stockage ne modifie pas l'équilibre de l'eau dans le sol. Il n'a pas été enregistré de surpression de la phase gazeuse ni de tassement notable. Les deux seuls paramètres modifiés par le stockage sont la température et la pression partielle de vapeur d'eau. Les conditions atmosphériques ne sont sensibles que dans une couche superficielle de 70 cm d'épaisseur environ et n'affectent pas le rendement du

water and water vapour as a result of the storage were minor. Energy transfers took place essentially by thermal conduction.

With the results of the physical model, a simplified mathematical model of a storage site in the ground was prepared. This model, established with a practical forecasting purpose in mind, provided profiles of water content and temperature in the storage site. It also gave access to the yield of the process. The results of this simplified model were first compared with the results of the physical model for validation. In a first approximation, there is agreement between the experimental and theoretical results. Application of the simplified model to storage at 60°C in a soil layer 3 m thick located 10 m below the surface of the ground suggests good yield for the process.

The study as a whole demonstrates that heat storage in soils is a process with a promising future.

stockage. Les calculs de flux montrent que les transferts, suivant la verticale, d'eau et de vapeur d'eau engendrés par le stockage sont faibles. Les transferts d'énergie s'effectuent essentiellement par conduction thermique.

À la suite des résultats du modèle physique, il a été élaboré un modèle mathématique simplifié d'un site de stockage dans un sol. Ce modèle, établi dans un esprit pratique de prévision, donne les profils de teneur en eau et de température dans le site de stockage. Il donne également accès au rendement du procédé. Les résultats de ce modèle simplifié ont d'abord été confrontés aux résultats du modèle physique dans un but de validation. En première approximation, il y a concordance entre résultats expérimentaux et résultats théoriques. L'application du modèle simplifié à un stockage à 60 °C dans une couche de sol de 3 m d'épaisseur située à 10 m au-dessous de la surface du sol laisse prévoir un bon rendement du procédé.

L'ensemble de l'étude montre que le stockage de chaleur dans les sols est un procédé prometteur.

AN EVALUATION OF SOLAR HEATING SYSTEMS WITH SEASONAL STORAGE IN NEW ENGLAND: SYSTEMS USING DUCT STORAGE IN ROCK AND HEAT PUMP

ÉVALUATION DES INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE SOLAIRE À STOCKAGE SAISONNIER EN NOUVELLE-ANGLETERRE: INSTALLATIONS UTILISANT LE STOCKAGE PAR CONDUITS DANS LE ROC ET LES POMPES À CHALEUR

D. S. Breger and A. I. Michaels
Argonne National Laboratory
Argonne, U.S.A.

This paper provides an assessment, for the New England region of the United States, of seasonal storage of solar energy using duct storage in rock and a heat pump. Adequate bedrock for large scale storage is available in the New England region. The winter climate requires large heating loads and the poor winter insolation is inadequate for significant solar contribution with diurnal or passive systems. The abundant solar supply during the remainder of the year is of great value when coupled with a seasonal storage facility. This work was performed as part of the U.S. effort in the International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Program, Task VII on Central Solar Heating Plants using Seasonal Storage (CSHPSS). This international collaboration has documented the great potential and cost-competitiveness of seasonal storage technology when applied to a large scale district heating scheme.

The assessment uses the MINSUN computer simulation developed by the IEA Task. The analysis considered a wide range of design parameters for a base case load scenario and several variations. Several economic scenarios are applied to these designs and the corresponding performance results to provide a basis for system optimization and conclusions regarding cost-effectiveness. Analysis was performed for flat plate and unglazed collectors, for a low and high temperature load demand, and for various locations in New England. A heat pump is used in the system to reduce storage temperature, thereby increasing collector efficiency and reducing losses.

The general results of the analysis indicates that the optimized systems provide 75-80% of the low temperature demand load and 60-65% of the high temperature demand load with solar

Cette étude porte sur l'évaluation d'une installation de stockage saisonnier d'énergie solaire avec forage dans le roc et pompe à chaleur en Nouvelle-Angleterre (États-Unis). On retrouve dans cette région une couche rocheuse qui convient bien au stockage à grande échelle. En hiver, les besoins en chauffage sont très élevés et l'ensoleillement n'est pas suffisant pour que les gains de chaleur par les systèmes diurnes ou passifs soient significatifs. Pendant le reste de l'année, l'apport solaire est abondant et peut présenter de grands avantages s'il est combiné avec un stockage saisonnier. Cette étude a été effectuée dans le cadre de la participation américaine au Programme de chauffage et de refroidissement solaire de l'Agence internationale de l'énergie, groupe de travail VII sur les centrales de chauffage solaire avec stockage saisonnier. Cette collaboration internationale a permis de démontrer le grand potentiel et le caractère concurrentiel du stockage appliqué à un réseau de chauffage urbain de grande capacité.

L'évaluation est fondée sur le programme informatique de simulation MINSUM mis au point par le Groupe de travail de l'AIE. Pour l'analyse, on a pris une vaste gamme de paramètres de calcul pour un scénario de base et diverses variantes. Plusieurs hypothèses économiques sont appliquées à ces paramètres et aux rendements correspondants pour servir de base à l'optimisation du système et aux conclusions sur le rapport efficacité-coût. L'analyse porte sur des capteurs plans sans vitrage et des charges à basse et haute température pour diverses localités en Nouvelle-Angleterre. Une pompe à chaleur sert à réduire la température de stockage, ce qui entraîne un meilleur rendement des capteurs et réduit les pertes.

L'analyse démontre de façon générale que les systèmes optimisés satisfont à 75-80 % des besoins basse température, et à 60-65 % des besoins haute température avec le solaire, le

energy, with the remaining portion coming primarily from the heat pump electrical input energy. The cost of the energy supplied by the system to the distribution network on an annualized basis and using the base case economic scenario is $44-52/MWH and $58-62/MWH for the low and high temperature loads, respectively. Significant reductions in cost are found when systems are financed with present incentives provided by the federal government. These results are encouraging in terms of the system cost-effectiveness relative to energy costs in the New England area which are comparable to these values.

reste correspondant surtout à l'énergie électrique consommée par la pompe à chaleur. Le coût de l'énergie fournie par le système au réseau de distribution sur une base annuelle et en fonction du scénario économique de base est de $44-52/MWh et de $58-62/MWh pour les besoins basse et haute température respectivement. On remarque des réductions importantes de coût lorsque ces systèmes ont bénéficié de subventions fédérales. Les résultats sont assez encourageants du point de vue du rapport efficacité-coût du système, compte tenu des coûts énergétiques en Nouvelle-Angleterre qui sont comparables aux valeurs données.

THERMAL ANALYSIS OF HEAT EXTRACTION BOREHOLES

ANALYSE THÉORIQUE DES FORAGES D'EXTRACTION DE CHALEUR

Johan Claesson, Per Eskilson
Lund Institute of Technology
Lund, Sweden

During the last few years, the use of vertical boreholes for heat extraction from rock has been a very popular way to decrease the oil demand for space heating of single-family houses in Sweden. The borehole (or heat-extraction well) contains a circulation fluid that extracts heat from the rock through conduction. After the fluid passes through a heat pump and is cooled, it is reinjected into the borehole. Thus, there is no net extraction of water from the borehole. Typical dimensions of a borehole are a depth of 137.16 m and a radius of 0.11 m.

At Lund Institute of Technology, a theoretical study of the thermal processes in the ground for both single and many interactive boreholes has been carried out. Analytical and numerical models have been developed to calculate transient temperatures and heat flows at the borehole walls and in the ground for a number of different borehole configurations, including cases with oblique boreholes. The numerical method adopted is a finite difference approach that uses a superposition of radially symmetric solutions and image techniques to obtain the correct boundary conditions and temperature distribution in the ground. The numerical and analytical methods have been used to develop a procedure for dimensioning a system with one or many boreholes. For the multiple borehole situation the long-term thermal process in the ground, includig the thermal influence between different boreholes, is taken care of with numerically calculated dimensionless functions.

In this paper a brief review is given of the procedure for dimensioning a system with heat extraction boreholes.

Depuis quelques années, l'utilisation de forages verticaux pour l'extraction de la chaleur du roc est devenue un moyen très populaire de réduction de la consommation de mazout dans les maisons unifamiliales en Suède. Le forage contient un caloporteur qui extrait la chaleur du roc par conduction. Le caloporteur passe ensuite dans une pompe à chaleur, ce qui le refroidit, et est réinjecté dans le forage. Les dimensions d'un forage typique sont 450 pieds de profondeur et 4.5 pouces de rayon.

L'Université de Technologie de Lund a effectué une analyse théorique des mécanismes de transfert thermique dans le sol aussi bien dans un forage unique que dans des forages communicants. Des modèles analytique et numérique ont été mis au point pour calculer les températures et les flux thermiques de transition sur les parois du forage et dans le sol pour un certain nombre de configurations, y compris des forages obliques. La méthode numérique choisie utilise le calcul des différences finies combinant des techniques de visualisation et des calculs sur des plans de révolution symétriques superposés permettant d'évaluer correctement les états limites et la répartition des températures dans le sol. Les modèles numérique et analytique ont été utilisés pour développer une méthode de dimensionnement d'une installation à un ou plusieurs forages. Dans ce dernier cas, le mécanisme d'échange thermique à long terme dans le sol, y compris les effets thermiques des forages les uns sur les autres, est représenté par des fonctions sans dimensions qui sont calculées numériquement.

Le présent document donne un aperçu de la marche à suivre pour dimensionner une installation comprenant des forages d'extraction de chaleur.

THE EFFECT OF CYCLIC THERMAL LOADING ON NEAR-SURFACE ENERGY STORAGE FACILITIES

L'EFFET DES CYCLES THERMIQUES SUR LES INSTALLATIONS DE STOCKAGE D'ÉNERGIE PEU PROFONDES

A. Crawford, University of Toronto
K.C. Lau, Strata Engineering Corp.
H.S. Radhakrishna, Ontario Hydro
Toronto, Canada

The use of in-situ soils for the storage of heat or cold energy is becoming increasingly prevalent. A proposal that appears to have merit is one in which the energy is stored in and extracted from the ground by buried conduits which act alternatively to heat and cool the subsurface storage system.

It is known that the thermal conductivity of soils is highly dependent on the moisture content of the soils. Drying of the soils causes a substantial reduction in the thermal conductivity. Typically, in near surface energy storage facilities, a reduction in the moisture content has been prevented by the construction of vapour barriers which act to retard moisture migration.

The studies presented in this paper were made to examine the potential of storage systems which have no such impermeable barrier. The effect of cyclic thermal loading on the change in moisture content and hence the thermal conductivity of the soils has been investigated. The concept used is to limit the drying of the soils by limiting the amount of heat input into the system such that the threshold moisture content at which large changes in the thermal conductivity occur is not reached.

The merit of such a scheme is that the system will inherently be more economic by the elimination of the impermeable barriers.

Le stockage de la chaleur ou du froid dans le sol est de plus en plus populaire. L'une des méthodes qui semblent les plus prometteuses consiste à utiliser des tubes enterrés qui tantôt chauffent, tantôt refroidissent le stockage souterrain.

On sait que la conductivité thermique des sols dépend en grande partie de leur teneur en eau. Leur dessèchement cause une réduction considérable de leur conductivité. Généralement, dans les installations de stockage peu profondes, on incorpore un pare-vapeur pour retarder le plus possible la migration de la vapeur d'eau.

Les travaux décrits par le présent document ont été entrepris pour étudier le potentiel de stockages ne comportant pas de pare-vapeur. On a analysé les effets des cycles thermiques sur la teneur en eau des sols et donc sur leur conductivité. Le concept utilisé consiste à réduire le dessèchement du sol en limitant la quantité de chaleur introduite dans l'installation de façon que le seuil de teneur en eau auquel une réduction importante de conductivité se produit ne soit jamais atteint.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet de réduire les coûts de construction grâce à l'élimination du pare-vapeur.

HEAT STORAGE IN CLAY
A TECHNICAL AND ECONOMICAL EVALUATION OF VERTICAL EARTH HEAT EXCHANGERS

STOCKAGE DE LA CHALEUR DANS L'ARGILE
UN ÉVALUATION ÉCONOMIQUE ET TECHNIQUE DES ÉCHANGEURS DE CHALEUR VERTICAUX SOUTERRAINS

G. Hellström
Lund Institute of Technology, Lund, Sweden
C. Palmgren, B. Rydell
Swedish Geotechnical Institute, Linköping, Sweden

Seasonal storage of heat in clay is one method to reduce the oil dependence for house heating demands. In Sweden there are many places with soft and deep clay deposits. This has led to a design of the earth heat exchanger where the heat transfer to the store takes place through thin plastic tubes which form U-shaped vertical loops in the clay layer. The heat carrier fluid circulates in the plastic tubes.

The aim of this study is to investigate how the construction cost of the ground heat store is influenced by the design of the earth heat exchanger. The heat transfer capacity of the earth heat exchangers is given by analytical solutions of the conductive heat flow problem in the ground. Designs with one, two, or three U-shaped loops in the earth heat exchanger have been studied. A combination of U-shaped loops and a core of saturated sand in the earth heat exchanger improves the heat transfer properties, and unfavourable changes of geotechnical properties in the storage region due to the thermal impact may be avoided.

Furthermore, an inventory of possible methods for installation of the earth heat exchangers have been made. Installation costs for the various configurations, including costs for connections and distribution network on the ground surface, have been estimated. Finally, a technical and economical comparison of the different types of earth heat exchangers is given for a storage volume of 50,000 m^3. Suggestions for a suitable design of the earth heat exchanger under various geotechnical conditions are given.

Le stockage saisonnier de la chaleur dans l'argile est une méthode permettant de réduire la consommation de mazout pour le chauffage des logements. En Suède, les dépôts d'argile molle sont très nombreux en profondeur. Le concept a conduit à la fabrication d'échangeurs de chaleur au moyen desquels la chaleur est transportée vers le stockage en empruntant des tubes verticaux minces en plastique ayant la forme d'un U qui pénètrent dans la couche d'argile. Le fluide caloporteur circule dans les tubes de plastique.

L'objectif de cette étude est de déterminer comment le coût de construction du stockage souterrain est modifié par la conception de l'échangeur souterrain. La capacité de l'échangeur de chaleur est donnée en résolvant analytiquement les flux de chaleur de conduction dans le sol. On a étudié des échangeurs de chaleur ayant une, deux ou trois boucles en U. En combinant des boucles en U et la présence d'un noyau de sable saturé au milieu de l'échangeur de chaleur, on a amélioré les caractéristiques de transfert thermique, et on a pu éviter des modifications défavorables des caractéristiques géotechniques dans la région du stockage.

De plus, on a étudié les diverses méthodes d'installation d'échangeurs de chaleur souterrains. Les coûts d'installation pour les diverses dispositions, comprenant les coûts de branchement et du réseau de distribution en surface. Finalement, on présente une comparaison technique et économique des différents types d'échangeurs thermiques souterrains pour un volume de stockage de 50 000 m^3. L'étude donne aussi quelques suggestions de conception d'un échangeur thermique pour diverses conditions géotechniques.

THERMAL PERFORMANCE OF GROUND HEAT EXCHANGERS. ANALYTICAL FORMULAS

FORMULES ANALYTIQUES DU RENDEMENT THERMIQUE D'ÉCHANGEURS DE CHALEUR SOUTERRAINS

Göran Hellström
Lund Institute of Technology
Lund, Sweden

During the last few years, many systems with heat storage in the ground have been built. These systems often use a channel or duct system for heat exchange between a heat carrier fluid, which circulates through the ducts, and the storage region in the ground. Examples of such ground heat exchangers are boreholes in rock and plastic tubes in clay.

The thermal process in the store is rather complicated. There is a local process around each ground heat exchanger and a global process in the storage volume and the surrounding ground. The local process determines the heat transfer properties of the ground heat exchanger.

Heat extraction pulses with a duration longer than about one week constitute an important particular process for the thermal analysis of a ground heat exchanger. For these pulses, the thermal influence between different ground heat exchangers is fully developed. A quasi steady-state condition is attained. The difference between fluid temperature and local average ground temperature becomes constant and proportional to the heat extraction rate. The proportionality factor gives the heat transfer capacity of the ground heat exchanger. Average heat extraction pulses with long duration and e.g. monthly base load are essentially of this character.

Analytical solutions of the quasi steady-state thermal process around a ground heat exchanger give explicit formulas for the heat transfer capacity of different types of ground heat exchangers. The following cases are treated:

1. Boreholes in rock. Heat carrier fluid flows to or from the bottom of the borehole via an inner tube.

Au cours des dernières années, on a construit plusieurs stockages thermiques souterrains. Il y a souvent un réseau de conduits dans lesquels un caloporteur transfère la chaleur au stockage souterrain. Les forages dans le roc et les tubes de plastique dans l'argile sont des types d'échangeurs thermiques souterrains.

Le processus thermique dans le stockage est assez complexe. Il existe un processus localisé autour de chaque échangeur de chaleur souterrain et un processus global dans le stockage et le sol adjacent. C'est le processus localisé qui détermine les propriétés de transfert de chaleur de l'échangeur souterrain.

Les impulsions d'extraction de chaleur d'une durée supérieure à environ une semaine jouent un rôle important dans l'analyse thermique d'un échangeur souterrain. On a déterminé, pour ces types d'impulsions, l'influence thermique entre différents échangeurs souterrains. Un état de quasi stabilité est atteint. La différence entre la température de fluide et la température moyenne locale du sol devient constante et proportionnelle au taux d'extraction de chaleur. Le coefficient de proportionnalité indique la capacité de transfert thermique de l'échangeur thermique souterrain. Les impulsions moyennes d'extraction de la chaleur de longue durée (par ex. la charge mensuelle de base) sont essentiellement de cette nature.

L'analyse d'un processus thermique de quasi stabilité à proximité d'un échangeur thermique souterrain fournit des formules précises pour la capacité de transfert thermique de divers types d'échangeurs souterrains. On a traité les cas suivants:

1. Forages dans le roc: le fluide caloporteur est acheminé par un conduit en partie inférieure du forage ou en remonte.

2. Boreholes in rock. Heat carrier fluid flows in one, two, or three U-shaped loops of small diameter tubing which are placed in the borehole.

3. Plastic tubes in clay. Designs with one, two, or three U-shaped plastic tubes.

4. Heat drain in clay. A combination of one, two, or three U-shaped plastic tubes and a core of water-saturated sand.

The thermal performance of different ground heat exchangers can be calculated with the use of these formulas. Hence, the formulas present a useful tool for assessment of the optimal design of a ground heat exchanger.

2. Forages dans le roc: le fluide caloporteur circule dans une, deux ou trois boucles en U formées par un conduit de faible diamètre et placées dans le forage.

3. Tubes de plastique dans l'argile: modèles comportant un, deux ou trois tubes de plastique en forme de U.

4. Drain thermique dans l'argile: comprend un, deux ou trois tubes de plastique en forme de U et une couche de sable saturé d'eau.

Ces formules peuvent servir à calculer le rendement thermique des divers types d'échangeurs souterrains. Elles sont aussi très utiles pour évaluer les caractéristiques optimales de conception d'un échangeur thermique souterrain.

THE SUNCOURT PROJECT

LE PROJET SUNCOURT

Hans Hydén and Johnny Kellner
VBB/SWECO, Swedish Consulting Group
Stockholm, Sweden

The Suncourt house, now under construction in Stockholm, is a low-energy multi-family house comprising 70 apartments. The house is equipped with a glass-covered courtyard.

During the summer the courtyard has to be cooled. Excess heat is brought to a seasonal heat storage unit under the house with the help of a heat pump. The heat storage unit is a borehole storage in rock comprising 25 boreholes to a depth of 80 m. The heat is stored at a maximum temperature of 15°C and the storage capacity is approximately 200 MWh. During the winter the storage unit is used as a heat source for the heat pump which covers the heating demands of the house.

The energy characteristics of the house have been simulated with the help of the computer simulation program DEROB. The results of the simulations have formed the basis for the design of the heating system, including the heat storage unit. The heating system is expected to become economically favourable, when taking into consideration the type of loans normally taken for this type of investment.

The construction is expected to be completed by the end of 1985.

Le projet Suncourt, qui est actuellement en voie de construction à Stockholm, se compose d'un immeuble de 70 appartements à faible consommation énergétique. L'immeuble comporte une cour intérieure avec verrière.

La cour doit être refroidie en été. Une pompe à chaleur achemine le surplus de chaleur vers un stockage thermique saisonnier sous l'immeuble. Ce stockage se compose de 25 forages dans le roc ayant une profondeur de 80 m. La chaleur est emmagasinée à une température maximale de 15 °C, et la capacité de stockage est d'environ 200 MWh. Pendant l'hiver, le stockage sert de source chaude pour la pompe à chaleur qui répond aux besoins en chauffage de l'immeuble.

On a simulé les caractéristiques énergétiques de l'immeuble au moyen du modèle informatique DEROB. Les résultats de la simulation ont servi de base à la conception de l'installation de chauffage, y compris le stockage thermique. On s'attend à ce que l'installation de chauffage soit économiquement rentable, surtout si l'on tient compte du type de prêts nécessaires pour ce genre d'investissement.

Les travaux de construction devraient être terminés à la fin de 1985.

TRANSIENT RESPONSE OF AN IN-GROUND VERTICAL CYLINDRICAL HEAT EXCHANGER THERMAL CHARACTERIZATION OF THE SOIL

RÉPONSE TRANSITOIRE D'UN ÉCHANGEUR CYLINDRIQUE VERTICAL DANS LE SOL CARACTÉRISATION THERMIQUE DU TERRAIN

Gilles Leroy
Université de Nantes
Nantes, France

Soils with low permeability (fine saturated or massive soils) are a favourable medium for the storage of off-season heat and a possible cold source for heat pumps. Large volumes of earth can be involved, using many tubular heat exchangers placed in drill holes, or even a single one of great length for a heat pump. The heat transfer fluid circulates in a closed system and heat transfer from or to the heat exchangers takes place by conduction.

A bidimensional, transitional model is presented of coupled heat transfers between a heat exchanger, consisting of two coaxial cylindrical tubes, and the soil.

The semi-analytical resolution of this model, for the enthalpic level type of pressure, and of the variable conditions of input, allows us to study the influence of the nature of the walls, the thermal resistance of the exchanger-soil contact, the inertia of the heat transfer fluid and the walls, the flow regimen and, of course, the thermal characteristics of the ground, on the performance of the heat exchanger. The association of several heat exchangers for a heat pump is considered.

Using simulations, it is shown that access to the various apparent thermal characteristics in the vicinity of the heat exchanger is possible: conductivity, diffusivity and thermal resistance of the exchanger-soil contact. The sensitivity of the model to these different parameters is tested. The effect of measurement errors on the results is observed. Finally, this method is compared to the "hot wire" method sometimes used to measure conductivity and contact thermal resistance.

Les sols peu perméables (sols fins saturés ou massifs) constituent un milieu favorable à la réalisation de stocks de chaleur inter-saisonniers et une source froide possible pour les pompes à chaleur. Des volumes importants de terrain peuvent être intéressés, à l'aide de nombreux échangeurs tubulaires placés dans des forages voire même d'un seul de grande longueur dans le cas d'une P.A.C. Le fluide caloporteur circule en circuit fermé et les transferts de chaleur, des ou vers les échangeurs ont lieu par conduction.

On présente une modélisation bidimensionnelle, transitoire des transferts thermiques couplés entre un échangeur formé de deux tubes cylindriques coaxiaux et le sol.

La résolution semi-analytique de ce modèle, pour une sollicitation du type échelon enthalpique, puis des conditions d'entrée variables, permet d'étudier l'influence de la nature des parois, de la résistance thermique de contact échangeur - sol, de l'inertie du fluide caloporteur et des parois, du régime d'écoulement, et bien sur, des caractéristiques thermiques du terrain sur les performances de l'échangeur. L'association de plusieurs échangeurs pour une pompe à chaleur est considérée.

A l'aide de simulations, on montre qu'il est possible d'accéder aux différentes caractéristiques thermiques apparentes au voisinage de l'échangeur: conductivité, diffusivité et résistance thermique de contact échangeur-sol. La sensibilité du modèle à ces différents paramètres est testée. L'influence des erreurs de mesure sur les résultats est observée. Enfin, la méthode est confrontée à celle du "fil chaud" quelquefois utilisée pour obtenir la conductivité et la résistance thermique de contact.

THE ECONOMICS OF DIFFERENT TYPES OF ENERGY STORAGE FOR LARGE AND MEDIUM SPACE HEATING SYSTEMS

RENTABILITÉ ÉCONOMIQUE DE DIFFÉRENTS TYPES DE STOCKAGES D'ÉNERGIE POUR INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE DES LOCAUX DE GRANDE ET MOYENNE PUISSANCE

Peter Margen
Margen-Consult AB
Nyköping, Sweden

The value of heat storage for space heating systems ranging in size from individual multiflat buildings to large district heating systems is examined for various time scales of storage - daily, intermediate and seasonal - and various types of base load heat sources for charging the stores - e.g. industrial waste heat, garbage, solid fuel boilers, heat pumps, cogeneration plants. The cost of different types of storage - steel vessels, earth pits, rock caverns, clay stores, drilled rock stores and aquifers are examined from built, tendered and designed projects and expressed as simplified cost equations. A comparison between the value and cost of storage is used to discuss which types of stores are best suited for different tasks. Pay-back time and net saving achievable for various applications are derived.

For stores at low temperatures requiring heat pumps for discharge, only stores which have seasonal storage as their main function are economicaly justified - when conditions are suitable. The most favourable types are drilled rock stores, clay stores and aquifers depending on local geotechnical conditions. Even small projects can be economic when sufficiently low temperatures are chosen.

For stores at higher temperatures not dependent on heat pumps for discharge, economic applications exist for all time scales but economic seasonal storage requires reasonably large systems. Steel vessels at atmospheric pressures and water filled earth pits are most favourable for short-term stores, drilled rock stores for long term

Le présent document analyse les bénéfices réalisables grâce au stockage thermique pour les installations de chauffage des locaux de différentes puissances: depuis celles desservant des immeubles à plusieurs logements jusqu'aux grandes installations de chauffage urbain. L'analyse est faite pour différentes périodes de stockage - quotidien, intermédiaire, saisonnier - et pour différentes sources de chaleur alimentant les stockages (chaleur industrielle récupérée, déchets, chaudières à combustibles solides, pompe à chaleur, centrales de cogénération). Les coûts de différents types de stockage (réservoirs d'acier, puits, cavités rocheuses, stockages dans l'argile, forages dans le roc et stockages en aquifère) sont analysés à la lumière de projets conçus et construits et sont exprimés par des équations simplifiées. Une comparaison des bénéfices et des coûts des stockages thermiques est utilisée afin de déterminer quels types de système conviennent le mieux à tel ou tel usage. La période d'amortissement et les économies réalisables pour différentes applications sont également évaluées.

Dans le cas des stockages à basse température nécessitant des pompes à chaleur pour la distribution, seuls ceux qui servent au stockage saisonnier sont justifiés sur le plan financier, lorsque les conditions le permettent. Les stockages les plus rentables sont les forages dans le roc, les réservoirs d'argile et les aquifères, tout dépendant des conditions géotechniques locales. Même de petits projets peuvent être économiques si des températures suffisamment basses sont choisies.

Dans le cas des stockages à température plus élevée où la restitution ne requiert pas de pompes à chaleur, il y a des applications rentables pour toutes les durées de stockage, mais il faut une assez grosse installation pour qu'un stockage saisonnier puisse être rentable. Les réservoirs d'acier à la pression atmosphérique et les puits remplis

storage. Where combined needs occur, a large drilled rock store complemented by a small water volume gives the best results. Rock caverns have only a limited economic niche for intermediate term storage on very large systems. These conclusions can be modified by local geotechnical conditions and special system requirements.

d'eau sont les plus avantageux pour le stockage à court terme, et les forages dans le roc pour les stockages à long terme. Lorsque les deux types de stockage sont nécessaires, un grand forage dans le roc complété par un petit volume d'eau donnent les meilleurs résultats. Les cavités rocheuses ne sont rentables que pour le stockage à moyen terme dans de très grandes installations. Ces conclusions pourraient être différentes dans d'autres conditions géotechniques locales et si les caractéristiques des installations étaient différentes.

Pay-back times between 2 years and 7 years are often attainable where conditions are suitable.

Dans des conditions favorables, la période d'amortissement peut varier entre 2 et 7 ans.

The numerical results are evaluated for Swedish conditions but comments on applicability elsewhere are included.

Les chiffres sont donnés pour les conditions d'exploitation en Suède, mais des commentaires sur leur utilisation dans d'autres pays sont également inclus.

The paper is based mainly on work done under a 1984 contract by BFR, but also conclusions from work done subsequent to that contract are reported.

Ce document est basé principalement sur les travaux effectués sous contrat par BFR en 1984, mais il contient aussi des conclusions sur des travaux entrepris depuis la fin de ce contrat.

ECONOMIC ASPECTS OF BOREHOLE HEAT STORES IN SWEDEN

ASPECTS FINANCIERS DU STOCKAGE DANS UN FORAGE EN SUÈDE

Bo Nordell
Luleä University of Technology, Luleä, Sweden
Torgny Sehlberg
Luleä Public Works
Luleä, Sweden

In 1982/83 the first large-scale borehole heat store was constructed at Luleä University of Technology, Sweden. The main part of the seasonal heat storage system is a rock volume of 100000 m^3. The store is utilized for heating of one of the university buildings, with a heat demand of 2 GWh. This demand corresponds to the need of 100 one-family-houses in northern Sweden. The store is connected to the district heating system. The heat is produced by surplus gas from the local steel plant. During May to October the store is heated to 65°C. During November to April the store is discharged, and the temperature is lowered to about 30°C. The store has been in operation since July, 1983.

In this paper the actual construction cost of the project is presented. The economic value of the know-how is discussed in terms of the expected construction cost of an identical heat store today. Based on the know-how of the project group the construction cost of a ten times enlarged (20 GWh) heat store is estimated. As a result of this estimation the heat cost is calculated and compared with corresponding costs of oil and electric heating.

Le premier grand forage pour le stockage thermique a été construit en 1982-1983 à l'Université de technologie de Luleä (Suède). La principale composante de cette installation de stockage saisonnier est un réservoir foré dans le roc dont la capacité est de 100 000 m^3. Ce stockage sert à chauffer un des bâtiments de l'université, dont la consommation de chaleur est de 2 GWh. Cette consommation est équivalente à celle de 100 maisons unifamiliales dans le nord de la Suède. Le stockage est relié au réseau de chauffage urbain. La chaleur est produite à partir des gaz résiduels d'une acierie voisine. De mai à octobre, le stockage est chauffé jusqu'à 65 °C. De novembre à avril, la chaleur est distribuée et la température du stockage redescend à environ 30 °C. Ce forage est en exploitation depuis juillet 1983.

Le présent document révèle les coûts réels de construction du projet. La valeur économique du savoir-faire est analysée du point de vue des coûts de construction prévus d'un stockage thermique identique de nos jours. En se basant sur l'expérience acquise, le groupe du projet a estimé les coûts de construction d'une installation dix fois plus importante (20 GWh). Grâce à cette estimation, on a pu calculer le coût du chauffage et le comparer aux coûts correspondants du chauffage électrique ou au mazout.

SYSTEM DESIGN FOR BOREHOLE HEAT STORES, GENERAL ASPECTS AND OPERATIONAL EXPERIENCE FROM THE STORE AT LULEÄ, SWEDEN

CONCEPTION D'INSTALLATIONS DE STOCKAGE THERMIQUE DANS DES FORAGES, ASPECTS GÉNÉRAUX ET EXPÉRIENCE D'EXPLOITATION DU STOCKAGE DE LULEÄ (SUÈDE)

Bo Nordell
Luleä University of Technology, Luleä, Sweden
Torgny Sehlberg
Luleä Public Works, Luleä, Sweden
Tomas Abyhammar
AIB Consulting Engineers, Solna, Sweden

Heat storing is not only a matter of heat capacity and losses. It is of great economical importance that charging and discharging can take place in a controlled, planned and optimal way. These points have been little discussed in the development of heat stores. In stores where heat is transported by pumping of the storing media (e.g. water in tanks or rock cavern stores) the heating/cooling power is simplified to a pumping capacity problem. For simulation of heat transport within the storage, useful mathematical models are available.

When a store of the "conduction" type is connected to a heat production and distribution system there will be specific and unconventional demands on the interface with the store. Especially the wide range of working temperatures to and from the store and the distribution systems must be considered.

In this paper the interface between the storage and the distribution system is analysed generally and specifically for borehole stores. The design of and operational experience from the 2 GWh Lulea storage for industrial waste heat at 70°C (described in other papers) are presented. Here discharge is carried out with a combined direct heat-exchanger and heat pump system operating in 3 modes. Heat is supplied to one large building with district heating back-up. Experience from 2 cycles 1983-1985 is presented.

Le stockage thermique n'est pas une simple affaire de capacité thermique et de déperditions calorifiques. Sur le plan financier, il est très important que les opérations stockage et de restitution soient contrôlées, planifiées et optimisées. Ces sujets ont été négligés dans l'élaboration des stockages thermiques. Dans les stockages où le transport de la chaleur se fait par pompage du milieu de stockage (par ex. l'eau dans les réservoirs et les cavités rocheuses), la puissance de chauffage ou de refroidissement se résume à un problème de capacité de pompage. Des modèles mathématiques sont maintenant disponibles pour simuler le transfert thermique à l'intérieur des stockages.

Lorsqu'un stockage du type à conduction est associé à une installation de production et de distribution de chaleur, l'interface du stockage est soumise à des conditions inhabituelles. Il faut particulièrement tenir compte des gros écarts des températures de service à l'entrée et à la sortie du stockage et des installations de distribution.

Le présent document analyse l'interface entre le stockage et le réseau de distribution en général et dans le cas particulier des stockages forés. Il décrit aussi la conception et l'expérience d'exploitation d'une installation d'une capacité de 2 GWh, construite à Luleä pour le stockage de chaleur industrielle récupérée à 70 °C. Dans ce cas, la distribution se fait par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur direct et d'une pompe à chaleur fonctionnant en trois modes. La chaleur est fournie à un grand édifice dont les besoins complémentaires sont assurés par le chauffage urbain. Les résultats de deux années d'exploitation (1983-1985) sont présentés.

DESIGN OF SHALLOW HORIZONTAL PIPE SYSTEMS USED AS A HEAT SOURCE FOR HEAT PUMPS

CONCEPTION DES RÉSEAUX DE TUYAUTERIE HORIZONTAUX PEU PROFONDS UTILISÉS COMME SOURCE FROIDE POUR LES POMPES À CHALEUR

Ingvar Rhen and Jan Sundberg
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

The Earth Heat Pump Group, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, has for several years been studying different systems of heat storage and heat extraction from the sub-surface. One field of work has been to make dimensioning rules for heat extractin systems with shallow pipes in soil connected to a heat pump. A finite difference program, that includes freezing, has been used to calculate the brine temperature depending on different heat extraction rates. Not only the extraction rates affect the brine temperature but also climate, soil properties, duration curve, the distance between the pipes and between pipe and ground surface.

Le Groupe des pompes à chaleur dans le sol de l'Université de technologie Chalmers, à Göteborg (Suède), étudie depuis plusieurs années différents systèmes de stockage et d'extraction de chaleur du sous-sol. L'un des sujets de travail a été l'établissement de règles de dimensionnement pour des installations d'extraction de chaleur comportant des canalisations peu profondes reliées à une pompe à chaleur. Un programme de calcul des différences finies tenant compte du gel a été utilisé pour calculer la température de la saumure en fonction de différents taux d'extraction de chaleur. La température de la saumure est affectée non seulement par le taux d'extraction, mais aussi par les conditions météo, par les propriétés du sol, par la courbe de consommation, par l'écartement des tuyaux et par la profondeur d'enfouissement des tuyaux.

This type of heat source with shallow buried pipes are very dependent on the climate conditions. The simulations have been done with three different ambient air temperatures and snow cover representing north, middle and south of Sweden. The possible annual heat extraction per m^2 ground surface for a certain soil can differ up to a factor of approximately two when comparing north and south of Sweden (normal climate conditions with snow cover).

Ce type de source de chaleur comportant des canalisations peu profondes est très dépendant des conditions climatiques. Des simulations ont été faites avec trois combinaisons différentes de températures d'air et d'épaisseurs de neige au sol correspondant aux conditions dans le nord, dans le centre et dans le sud de la Suède. La quantité de chaleur qui peut être extraite annuellement par m^2 de superficie d'un sol donné peut varier dans une proportion de deux pour un lorsqu'on compare le nord et le sud du pays (dans les conditions climatiques normales et avec l'épaisseur de neige habituelle).

Nine different soils with different thermal properties have been used in the simulations. They represent peat, clay and sandy soils with different water contents, density and quartz content. The most important parameter just considering the soil is the water content. A saturated sand is approximately 4 times better than a fairly dry sand. Especially in sandy soils it can be difficult to predict the thermal properties because the water content can vary much in a vertical

Neuf sols ayant des propriétés thermiques différentes ont été utilisés dans ces simulations. Ils sont représentatifs des sols tourbeux, argileux et sableux avec différentes teneurs en eau, masses volumiques et teneurs en quartz. Le paramètre le plus important est la teneur en eau du sol. Un sable saturé est environ quatre fois supérieur à un sable assez sec. Il peut être difficile de prédire les propriétés thermiques, en particulier s'il s'agit d'un

profile if the groundwater level is fluctuating during the year. Therefore it is important to know the groundwater level in soils which are coarse grained.

Two duration curves, peak- and constant load, have also been used to distribute the annual energy demand. About two times more annual heat per m^2 ground surface can be taken from the ground if it is a heat pump system that is run with a constant power instead of peak power during the year. The peak-power is directed by ambient air temperature (10-days mean).

A great number of computer simulations have been done and the results are presented in diagrams showing how the minimum brine temperature depends on the annual heat extraction rate, and pipe distance for a certain soil and climate.

sol sableux, parce que la teneur en eau peut trop varier dans le plan vertical si le niveau de la nappe d'eau souterraine fluctue au cours de l'année. Il est donc important de connaître le niveau de la nappe phréatique dans le cas des sols à particules grossières.

Deux courbes de consommation (demande de pointe et demande constante) ont également été utilisées pour répartir la consommation d'énergie annuelle. On peut tirer deux fois plus de chaleur par m^2 de sol lorsque la pompe à chaleur fonctionne à régime constant plutôt que pendant des pointes au cours de l'année. La puissance de pointe est commandée par la température de l'air ambiant (moyenne de 10 jours).

Un grand nombre de simulations informatisées ont été effectuées et les résultats sont présentés sous forme de diagrammes montrant comment la température minimale de la saumure dépend du taux annuel d'extraction de chaleur et de l'écartement des tuyaux pour un sol et un climat donnés.

CAPACITY OF SATURATED OR UNSATURATED SOIL TO RESTORE CALORIES BY GELATION

APTITUDES D'UN SOL, SATURÉ OU NON SATURÉ, A RESTITUER DES CALORIES PAR GELIFICATION

C. Saix, P. Jouanna
Université des Sciences et Techniques du Languedoc
Montpellier, France

The efficiency of off-season storage of solar energy in saturated or unsaturated soils may be greatly increased by the possibility of using such soils as a cold heat pump source below 0°C.

The attraction of this energy recovery form lies in the use of the latent heat of phase change of the water in the soil.

However, there are still some unknowns that remain concerning the soil types best suited to this process and possible risks or operational problems essentially related to the behaviour of the soil in the vicinity of the heat exchanger.

The purpose of this study is development of a system for energy extraction by soil gelation and application of this system:

- in the laboratory, using cylindrical samples (Ø = 43 cm, h = 40 cm) of three types of soil: saturated sand, silt (reworked samples) and clay (intact sample);
- on location, using a prototype of a large-scale energy storage and recovery facility (layer of unsaturated silt 3.00 m thick).

The laboratory tests consist of submitting the soil sample to five periods of 48 h, consisting of a 24-h energy extraction phase and a 24-h energy replenishment phase.

The parameters studied are as follows:

- power and energy;
- range of soil temperatures;
- capillary suction in the soil;

L'efficacité du stockage intersaisonnier d'énergie solaire dans des sols, saturés ou non-saturés, peut-être largement améliorée par la possibilité d'utiliser ces sols comme source froide de pompe à chaleur en dessous de 0 °C.

L'intérêt de cette récupération d'énergie réside dans l'exploitation de la chaleur latente de changement de phase de l'eau du sol.

Mais certaines inconnues demeurent encore actuellement sur les types de sols les mieux adaptés à ce procédé et sur d'éventuels aléas ou difficultés d'exploitation liés essentiellement au comportement du sol au voisinage de l'échangeur.

L'objet de cette étude est la réalisation d'un système d'extraction d'énergie par gélification de sol et l'utilisation de ce système:

- en laboratoire sur des échantillons cylindriques (Ø = 43 cm, h = 40 cm) de trois types de sol: sable saturé et limon (échantillons remaniés), argile (échantillon intact);
- in situ sur un prototype d'installation de stockage et de récupération d'énergie de grande taille (couche de limon non-saturé de 3,00 mètres d'épaisseur).

Les essais en laboratoire consistent à soumettre l'échantillon de sol à cinq périodes de 48 h composées d'une phase d'extraction d'énergie de 24 h et d'une phase de recharge d'énergie de 24 h.

Les paramètres étudiés sont:

- la puissance et l'énergie;
- le champ des températures dans le sol;
- la succion capillaire dans le sol;

- swelling or compaction at the soil surface;

- cracking of the soil.

The tests on location enable us to work on the prototype level and to establish comparisons with the laboratory tests. The period is 96 h long.

The analysis of the experimental results, leading to a classification of the soils studied in terms of their capacity to restore calories by gelation, depends essentially on examination of changes in the different parameters with time, in order to determine invariance or variance in energy recovery.

Attached is an example of the variation in extraction and replenishment power values during period No. 1 of the test on clay, and the variation in swelling with time during the five test periods on clay.

- le gonflement ou tassement à la surface du sol;

- la fissuration du sol.

Les essais in-situ permettent de travailler à l'échelle du prototype et d'établir des comparaisons avec les essais en laboratoire. La durée de la période est de 96 h.

L'analyse des résultats expérimentaux, qui amène à un classement des sols étudiés quant à leurs aptitudes à restituer des calories par gélification, repose essentiellement sur l'examen de l'évolution des différents paramètres dans le temps afin de juger de l'invariance ou de la variance de la récupération d'énergie.

On donne en annexe à titre d'exemple, la variation des puissances d'extraction et de recharge lors de la période N° 1 de l'essai sur l'argile ainsi que la variation du gonflement dans le temps au cours des cinq périodes de l'essai sur l'argile.

THERMAL CONDUCTIVITY OF ROCK AND SOIL

CONDUCTIVITÉ THERMIQUE DES ROCHES ET DES SOLS

Jan Sundberg
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

At the Earth Heat Pump Group, Department of Geology, Chalmers University of Technology, thermal parameters of soil and rock have been examined for several years. This has been done in connection with projects using ground as a heat source or as an energy storage. The result of this study is soon to be published.

In rock, about 3000 samples form the basis for an extensive statistical study of thermal conductivity for different rock types in Sweden.

In soil a large number of thermal conductivity measurements have been carried out in connection with determinations of water content, density, water retension curve and for some samples also the mineral content. Diagram for the thermal conductivity of different Swedish soil types have been established.

The project has been supported by the Swedish Council for Building Research.

Le Groupe des pompes à chaleur dans le sol du département de géologie de l'Université de technologie Chalmers étudie depuis plusieurs années les paramètres thermiques des roches et des sols. Ces analyses ont été faites en conjonction avec des projets utilisant le sol comme source de chaleur ou comme milieu de stockage. Les résultats obtenus seront publiés prochainement.

Quelque 3 000 échantillons constituent la base d'une vaste analyse statistique de la conductivité thermique des différents types de roches qu'on retrouve en Suède.

Pour ce qui est des sols, un grand nombre de mesures de conductivité thermique ont été prises en conjonction avec des mesures de teneur en eau, de masse volumique, de rétention d'eau et, pour certains échantillons, de teneur en minéraux. Un diagramme de la conductivité thermique de différents types de sols qu'on retrouve en Suède a été établi.

Le projet a reçu l'appui financier du Conseil suédois de recherche en bâtiment.

HEAT PUMP WITH A HARD ROCK WELL EQUIPPED FOR THERMAL RECHARGING

POMPE À CHALEUR AVEC PUITS FORÉS DANS LA ROCHE DURE ÉQUIPÉE POUR LE RECHARGEMENT THERMIQUE

Johan Tollin
AIB Consulting Engineers
Solna, Sweden

In Sweden approximately 3000 domestic heat pump systems per year are installed, using a well drilled in hard rock as a heat source. The depth of the wells normally varies between 100 m and 200 m.

In this project a system is tested which includes a seasonal storage of low temperature heat. The heat is charged in the bedrock during the summer aiming to increase the COP and to reduce the necessary depth of the well. The project is supported by the Swedish Council for Building Research.

A well drilled in hard rock with an effective depth of 90 m is the heat source for a heat pump in a one family dwelling in southern Sweden. The system is equipped with a low temperature air heat exchanger to charge the bedrock during the summer. The heat pump covers completely the energy demand for heating and hot water production, which is approximately 33 MWh/year. From the heat source approximately 20 MWh/year is abstracted.

The heat pump was installed in autumn 1979 and has exclusively used the bedrock as heat source until August 1984. At that time equipment was installed for charging low temperature heat in the bedrock mainly during summer and temporarily during spring and autumn. The stored heat is used during heating season.

The well is totally 100 m deep with a diameter of 0,11 m. The effective depth, i.e. the depth of the water column is 90 m. An antifreeze solution is circulated between the heat pump, the air heat exchanger and a U-shaped coil of PEL in the well.

En Suède, environ 3 000 pompes à chaleur de chauffage domestique sont mises en place par année et utilisent un puits foré dans la roche dure comme source de chaleur. La profondeur des puits est comprise normalement entre 100 m et 200 m.

Dans ce projet une installation est mise à l'essai. Elle comprend un stockage saisonnier de chaleur à basse température. La chaleur est transférée à la roche au cours de l'été de façon à augmenter le rendement et à réduire la profondeur du puits. Le projet est subventionné par le Conseil suédois de la recherche en bâtiment.

Dans le sud de la Suède, la pompe à chaleur d'un logement unifamilial utilise comme source chaude un puits foré dans la roche dure d'une profondeur effective d'environ 90 m. L'installation est équipée d'un échangeur de chaleur à air du type basse température de façon à réchauffer la roche au cours de l'été. La pompe à chaleur satisfait à la demande totale d'énergie de chauffage et d'eau chaude, soit environ 33 MWh/année. Environ 20 MWh/année sont extraits de la source chaude.

La pompe à chaleur a été mise en place au cours de l'automne 1979 et n'a pas utilisé d'autre source de chaleur que la roche jusqu'en août 1984. A cette époque, un équipement a été mis en place pour élever légèrement la température de la roche au cours de l'été et temporairement au cours du printemps et de l'automne. La chaleur stockée a été principalement utilisée au cours de la saison de chauffage.

Le puits a une profondeur totale de 100 m et un diamètre de 0.11 m. La profondeur effective, c'est-à-dire la profondeur de la colonne d'eau est de 90 m. Une solution antigel circule entre la pompe à chaleur, l'échangeur de chaleur et le serpentin en U du PEL dans le puits.

The air heat exchanger consists of a 170 m of PEH coil (diameter = 0,025 m) in the shape of a cylinder with height 1,1 m and diameter of 1,6 m. The heat exchanger is placed in the garden at a height of 2,2 m. The charging of the bedrock is started when the air temperature exceeds 8°C, which is the temperature of the natural bedrock. The total amount of stored heat is expected to be 30-60% of the heat normally extracted from bedrock.

The project aims to quantify the advantages of recharging low temperature heat to the bedrock with a very simple and cheap air heat exchanger. For a single well system the advantages will be a higher COP or possibility to reduce the depth of the well. For a multiwell system the recharging will also reduce the negative thermal influence between the wells.

Preliminary results of 9 months operation will be presented in the paper including economic benefit estimations.

L'échangeur de chaleur à air comprend 170 m de serpentin PEH (diamètre = 0.025 m) en prenant la forme d'un cylindre d'une hauteur de 1.1 m et d'un diamètre de 1.6 m. L'échangeur de chaleur est placé dans le jardin à une hauteur de 2.2 m. Le réchauffage de la couche de roche commence lorsque la température de l'air dépasse 8 °C (température naturelle de la roche). La quantité totale de chaleur stockée est généralement de 30 à 60 % de la chaleur normalement extraite de la roche.

Le projet a pour but d'évaluer l'intérêt d'élever la température de la couche de roche à l'aide d'un échangeur thermique simple et peu onéreux. Pour un système avec un seul puits, l'avantage résiderait dans un meilleur rendement ou dans la possibilité de réduire la profondeur du puits. Pour un système à plusieurs puits, le réchauffement de la roche réduira également les pertes thermiques entre les puits.

Les premiers résultats des 9 mois d'observation sont présentés dans cette note ainsi qu'une évaluation des économies réalisables.

VALIDATION OF "DUCT-STORE" MODELS WITH EXPERIMENTAL DATA FROM THE GRONINGEN PROJECT

VALIDATION DES MODÈLES "DUCT-STORE" AVEC DONNÉES EXPÉRIMENTALES DU PROJET DE GRONINGEN

A.J.Th.M. Wijsman
TNO Institute of Applied Physics, Delft, The Netherlands
G.A.M. van Meurs
Delft University of Technology, Delft, The Netherlands

In Groningen, the Netherlands, a project with seasonal heat storage of solar heat in the upper layer of the soil has been realized. The project consists of 96 solar houses, each with 25 m^2 of high performance solar collectors mounted on the south facing roof, and a seasonal heat store of about 23 000 m^3 (depth 20 m) of water saturated sandy soil. The seasonal heat store in the soil consists of a layer of soil in which the vertical tube heat exchanger is inserted. Only the top of the store is furnished with an insulation layer.

In the first phase of this project the seasonal heat store was tested. With a boiler and a cooler the heat input to and the heat output from the seasonal heat store was simulated. In this way experience with the operation of the seasonal heat store and experimental data were gathered.

The experimental data was used for the validation of the various computer models for the seasonal heat store. Some of the models describe the global heat transfer process in and around the heat store. Others take the local heat transfer process around the heat exchanger tubes into account.

In this paper the various computer models for the seasonal heat store are described and the results of the validation work are given.

À Groningen, aux Pays-Bas, un projet de stockage saisonnier de la chaleur solaire dans la couche supérieure du sol a été réalisé. Le projet consiste en 96 maisons solaires, chacune ayant 25 m^2 de capteurs solaires à haut rendement montés sur le côté sud du toit et un réservoir de stockage saisonnier de la chaleur d'environ 23 000 m^3 (profondeur de 20 m) rempli de sable saturée d'eau. Le réservoir de stockage saisonnier comprend une couche de sol dans laquelle des tubes verticaux servent d'échangeurs de chaleur. Seul le dessus du réservoir est recouvert d'une couche d'isolant.

Dans la première phase du projet, le réservoir de stockage saisonnier a été testé. À l'aide d'une chaudière à eau et d'un système de refroidissement, on a simulé l'apport et la production de chaleur du réservoir de stockage saisonnier. On a pu ainsi obtenir par expérience des données expérimentales sur son fonctionnement.

Les données expérimentales ont été utilisées pour la validation de différents modèles numériques, dont certains décrivent le transfert global de chaleur dans le réservoir et autour de lui. D'autres modèles prennent en compte le transfert local de chaleur qui a lieu autour des tubes échangeurs de chaleur.

On décrit dans ce document les différents modèles de simulation du réservoir de stockage saisonnier ainsi que les résultats du travail de validation.

DEVELOPMENT OF HEAT STORAGE SYSTEMS WITH VERTICAL PIPES IN EARTH AND ROCK

DÉVELOPPEMENT D'INSTALLATIONS DE STOCKAGE THERMIQUE À TUBES VERTICAUX DANS LE SOL ET LE ROC

Peter Wilén, Ingvar Rhen, Bernt Bäckström
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

A few heat storages with vertical pipes in rock and clay have been built in Sweden in the last five years. Most well known are perhaps Lindälvsskolan (storage in clay) and the heat store in Luleä (storage in rock). The systems in clay are maybe best suited for low temperature storage but borehole storages in rock can also store heat at higher temperatures. In Sweden these systems are economic to use only in some cases but if the investment cost can be reduced the demand for heat storage will increase.

Experiences by the Earth Heat Pump Group show that the investment cost of the heat storage can roughly be divided into three important parts:

- drilling and installation of the vertical pipes;
- connection of the vertical pipes with the horizontal pipe lines in the ground surface;
- work at the ground surface (excavation, restoring, etc.).

The three parts depend on each other and especially the last point is of big importance for heat storage application in built-up areas. In this case all costs for restoring the ground surface must be included in the investment cost for the store.

This study is one part of a Danish-Swedish Cooperation project. The Danish part is carried out by the Danish Geotechnical Institute (DGI) and the Swedish part by the Earth Heat Pump Group. The Swedish part is funded by the Swedish Council for Building Research and consists of a "state of the art"

Quelques installations de stockage thermique à tubes verticaux dans le roc ou l'argile ont été construites en Suède au cours des cinq dernières années. Les plus connues sont sûrement celles de Lindälvsskolan (stockage dans l'argile) et de Luleä (stockage dans le roc). Le stockage dans l'argile convient peut-être davantage aux basses températures, mais les forages dans le roc permettent de stocker à des températures plus élevées. En Suède, ces installations ne sont rentables que dans certains cas, mais si les coûts d'investissement peuvent être réduits, la demande de stockage thermique augmentera.

Des expériences faites par le Groupe des pompes à chaleur dans le sol indiquent que les coûts d'un stockage thermique se subdivisent en gros en trois catégories principales:

- forage et mise en place des tubes verticaux;
- raccordement des tubes verticaux aux canalisations horizontales peu profondes;
- travaux de terrassement de surface (excavation, remblayage, etc.).

Ces trois catégories sont interdépendantes et la dernière revêt une importance primordiale dans les zones urbaines. Dans ce cas, tous les coûts de remise à l'état initial du terrain doivent être inclus dans les dépenses d'investissement du stockage thermique.

La présente étude fait partie d'un projet de collaboration Danemark-Suède. Les travaux du Danemark sont effectués par l'Institut géotechnique danois, ceux de la Suède, par le Groupe des pompes à chaleur dans le sol. Les travaux de la Suède sont financés par le Conseil suédois de recherche en bâtiment.

list of methods to construct this type of heat store in rock and clay. It deals with:

- drilling methods in rock (in cooperation with Luleä University of Technology;
- drilling methods in clay;
- heat exchangers in the drilled borehole and comparison of different heat exchangers' heat transfer efficiency;
- different storage geometries are studied in order to see how the restoring work in the ground surface can be reduced.

The aim of the first part of the project is to investigate the possible cost reductions that can be gained by developing the technique of heat storage constructions. The first part will be reported in the spring/ summer 1985.

Ils portent sur l'établissement d'un bilan des méthodes actuelles de construction de ce type de stockage dans le roc ou l'argile, principalement sur les aspects suivants:

- les méthodes de forage dans le roc (en collaboration avec l'Université de technologie de Luleä);
- les méthodes de forage dans l'argile;
- les échangeurs de chaleur dans le forage et la comparaison de l'efficacité de transfert thermique de différents échangeurs de chaleur;
- différentes configurations de stockage sont analysées afin de déterminer comment on pourrait réduire les travaux de remise en état du terrain.

Le but de la première partie de ce projet est d'évaluer les réductions de coûts qui peuvent être réalisées par l'amélioration des techniques de construction des stockages. Cette partie des travaux fera l'objet d'un rapport au printemps ou à l'été 1985.

ICE/ GLACE

Anthony J. Gorski, B.S. Physics,
M.S. Physics, P.E.
Solar Energy Group
Argonne National Laboratory
Argonne, Illinois, U.S.A.

THE "FABRIKAGLACE" PROCESS TO MAKE AND STORE NATURAL ICE

LE PROCESSUS "FABRIKAGLACE" POUR FABRIQUER ET STOCKER DE LA GLACE NATURELLE

Sarto Buies
Centre de Recherche Industrielle du Québec
Ste-Foy, Canada

This research project has the objective of demonstrating the possibilities of using the natural coldness in unlimited quantity that surrounds us during the months of winter in Canada. This natural resource would be used to air condition buildings during the following summer.

Ce projet de recherche a pour objectif de démontrer qu'il est possible d'utiliser le froid en quantité quasi illimitée de l'hiver canadien. Cette ressource naturelle qu'est le froid pourrait être utilisée pour la climatisation des bâtiments en été.

The ice is made during the winter in a well insulated shelter called "Fabrikaglace" and stored for use several months later for air conditioning of buildings or for other uses.

Il s'agit de former de la glace l'hiver dans un puits isolé thermiquement et appelé "Fabrikaglace". La glace stockée pendant plusieurs mois peut ensuite servir à la climatisation des bâtiments ou à d'autres usages.

Such a block of ice can be made at any dimensions of base surface, but the height is limited by the amount of yearly coldness available in a country. In the Quebec city area, for instance, an ice block of about 13 m in height can be produced.

Le bloc de glace peut avoir des dimensions très importantes horizontalement mais sa hauteur est limitée par la quantité de froid annuel disponible. Dans la région de la ville de Québec, par exemple, un bloc de glace d'environ 13 m de hauteur peut être fabriqué au cours de l'hiver.

While the block is growing by the successive addition of thin layers of city water, the expansion of the ice is taken care by a special construction of the container.

Le bloc de glace se forme par additions successives de couches d'eau de la ville. La variation volumique de la glace n'est pas un obstacle en raison de la conception spéciale du contenant.

The ice is formed due to an exchange of energy with the cold outside air brought in by a forced circulation system which distributes the air evenly over the surface of the ice at a separating height of about 0.30 m, in order to get the best coefficient of heat transfer by convection.

La glace se forme par échange d'énergie avec l'air extérieur froid au moyen d'un système à air pulsé qui distribue l'air de façon uniforme sur toute la surface de la glace et sur une hauteur d'environ 30 cm de façon à obtenir le meilleur coefficient de transfert thermique par convection.

The city water is sprayed automatically by a motorized revolving sprinkler, each time in equal amount (2 mm thick layer), at some variable time intervals as a function of the outside temperature.

L'eau de la ville est aspergée automatiquement au moyen d'un arroseur rotatif motorisé qui répand de façon régulière une couche de 2 mm d'épaisseur d'eau à des intervalles de temps qui sont fonction de la température extérieure.

Being suspended by flexible air tubes, all this ice making apparatus is lifted gradually as the ice grows, and automatically under the command of a micro-computer working under a

Étant suspendu par des tubes flexibles, tout l'équipement se soulève progressivement au fur et à mesure que la glace se forme grâce aux commandes d'un micro-ordinateur répondant

pre-established signal called DMF (Degree Minutes of Freezing).

To transfer the wasted energy from the air conditioning system to the block of ice, the melting water is used in an open circuit piping along with a heat exchanger, a spraying device, and a circulating pump which is controlled by an aquastat immersed in the chilled water of the air conditioning system.

Underneath such a large scale "Fabrikaglace" the temperature of the ground being too high, that is 4°C to 7°C, a cold air circulation system must be installed underneath the base slab and controlled to maintain the temperature at this place between -4°C and -1°C.

à un signal préétabli appelé DMF (Degree Minutes of Freezing ou degré minutes de gel).

Pour transférer au bloc de glace l'énergie perdue par l'installation d'air climatisé, l'eau de la fonte est utilisée dans un circuit ouvert combiné à un échangeur de chaleur, un dispositif d'aspertion et une pompe, la régulation étant réalisée par un aquastat immergé dans l'eau réfrigérée de l'installation d'air conditionné.

Comme la température du sol est trop élevée sous le Fabrikaglace 4 °C à 7 °C, de l'air froid à une température comprise entre -4 °C et -1 °C doit passer sous la dalle.

AN ANNUAL STORAGE ICE SYSTEM FOR SUMMER COOLING

INSTALLATION DE STOCKAGE ANNUEL DU FROID SOUS FORME DE GLACE POUR LA CLIMATISATION EN ÉTÉ

C.E. Francis
Illinois State University
Normal, U.S.A.

This project involves the design, construction, and testing of an annual cycle cooling system. Developed and constructed at Illinois State University, this system uses the natural coldness of winter air to chill a circulating heat transfer fluid down to temperatures below 0°C. The chilled heat transfer fluid is then pumped through a series of pipes contained in a water saturated earth mass. This saturated earth mass is contained in a plastic lined underground pit. After two or three months of winter operation, the storage mass is completely frozen.

During the following summer the heat transfer fluid is again circulated through the ice-earth storage mass and then through an indoor air-coil heat exchanger where the cooling capacity of the ice is recovered. Chilled air as low as 4°C is obtained from the air-coil. This system has been designed to provide 100% of the summer air conditioning requirement for an average size well insulated home located in central or northern Illinois (40°NL).

The energy requirement for this system will be 10 to 20% of that required for conventional air conditioning. The system was first started up on November 17, 1983. At that time the mass temperature was 13°C. By December 9th the mass had been cooled to 0°C but was not yet frozen. On December 24th the temperature began to drop below 0°C, indicating that most of the mass was frozen. 672 hours of operation were required to freeze most of the mass. System operation after December 24th simply caused the mass to grow in size, freezing some soil outside of the mass. During the first freezing season, 17,868 MJ were stored. The summer thaw cycle was begun on June 15, 1984 and continued for 32 days, extracting 9,413 MJ at a rate of 3.4 kW. An estimated 5 to 8% of the stored

Ce projet porte sur la conception, la construction, et la mise à l'épreuve d'une installation de refroidissement à cycle annuel. Cette installation conçue et construite à l'Université de l'Illinois utilise la basse température de l'air hivernal pour réfrigérer un fluide caloporteur à des températures inférieures à 0 °C. Le fluide ainsi refroidi circule par pompage dans une série de tuyaux enfouis dans une masse de terre saturée d'eau. Cette masse de terre saturée est enveloppée dans un revêtement de plastique au fond d'un puits. Après deux ou trois mois de fonctionnement, la masse est complètement gelée.

Au cours de l'été suivant le fluide caloporteur circule dans la masse gelée et passe dans un échangeur avec serpentin à ailettes situé à l'intérieur où le froid est récupéré. On peut obtenir ainsi de l'air froid à une température aussi basse que 4 °C. Ce type d'installation a été conçu pour fournir 100 % de la demande en air climatisé d'une maison de taille moyenne bien isolée thermiquement située au centre ou au Nord de l'Illinois (40°LN).

La consommation d'énergie de cette installation devrait être de 10 à 20 % de celle d'une climatisation classique. L'installation a fonctionné la première fois le 17 novembre 1983. Ce jour là la température de la masse de terre était de 13 °C. Le 9 décembre elle était de 0 °C mais n'avait pas encore gelé. À partir du 24 décembre la température s'est abaissée sous 0 °C, ce qui indiquait que la plus grande partie de la masse était gelée. Au total il a fallu 672 heures de fonctionnement pour geler la masse. Le fonctionnement de l'installation après le 24 décembre a seulement permis une augmentation de volume de la masse gelée en gelant le sol voisin. Au cours de la première saison de gel 17868 MJ ont été stockés. Le cycle de dégel d'été

energy remained at the end of the 32-day test period.

a commencé le 15 juin 1984 et s'est poursuivi pendant 32 jours, ce qui a permis d'extraire 9413 MJ a un taux de 3.4 KW. Il restait selon les estimations environ de 5 à 8 % de l'énergie stockée à la fin des 32 jours de la période d'essai.

The 1984-85 season will provide another year of data prior to the conference in Beijing. This system works very well. It was formally recognized by the United States Department of Energy and received a D.O.E. award for energy innovation, October 1, 1984.

La saison 1984-1985 permettra d'obtenir une autre année de données avant la conférence de Beijing. L'installation fonctionne très bien. Elle a été reconnue par le ministère de l'énergie des Etats-Unis et a obtenu un prix de ce ministère pour l'innovation en matière d'énergie, le 1er octobre 1984.

SEASONAL ICE STORAGE

STOCKAGE SAISONNIER DANS LA GLACE

C.E. Francis
Illinois State University, Normal, U.S.A.
R.T. Tamblyn
Engineering Interface Limited, Willowdale, Canada

This paper describes the design and economic projections for an annual storage ice system designed to cool a 100,000 square foot building with a 200 ton load based on 1 ton per 500 square feet of conditioned floor space. The storage mass, located underground, will support a parking lot alongside the building.

The basic Frozen Earth Annual Storage Ice System has been developed and tested at Illinois State University, Normal, Illinois, U.S.A. This system has been under development for three years and has gone through nearly two years of testing. Initial concept tests were performed on a system with a 4000 cubic foot mass, designed to provide summer air conditioning for a well insulated home in the Midwest. First year testing indicates that the system operates reasonably close to projections while optimization will increase the COP substantially.

Based upon this work, it has been determined that a thermal storage mass of 450,000 cubic feet containing 50% water will support a 200 ton cooling load for 750 full load hours per year or 150,000 ton-hours. With an estimated construction cost of $350,400, this system will provide seasonal savings of $43,525 and a simple payback of 4.6 years. The cost of this system is $2.34 per ton-hour of stored capacity. It was assumed that land adjacent to the building to be cooled would be available for the storage mass and that a parking lot could be located on top; therefore no charge was made for the land nor do any of the calculated costs include parking lot expenses. Two additional designs are also included, one for a cold climate such as Edmonton, Alberta, Canada and one for a moderately warmer climate such as Springfield, Illinois, U.S.A.

Ce document décrit la conception et les économies prévues d'un système de stockage annuel dans la glace destiné à refroidir un édifice de 100 000 pieds carrés d'une charge de 200 tonnes répartie en raison d'une tonne par 500 pieds carrés de locaux à climatiser. La masse souterraine de stockage supportera un terrain de stationnement près de l'édifice.

Le système de base de stockage annuel dans la glace a été conçu et mis au point à l'Université d'État de l'Illinois à Normal, Illinois (É.-U.). L'étape d'élaboration a duré trois ans et les essais ont eu lieu pendant presque deux ans. Les premiers essais du concept ont été effectués sur un système d'une masse de 4 000 pieds cubes devant servir à climatiser une maison bien isolée du Midwest. Les essais de la première année indiquent que le système fonctionne à peu près comme prévu et que l'optimisation permettra d'augmenter considérablement le coefficient de performance.

D'après ces travaux, on a établi qu'une masse de stockage d'énergie thermique de 450 000 pieds cubes contenant 50 % d'eau pourrait répondre à une charge de refroidissement de 200 tonnes pendant 750 heures par année, c'est-à-dire 150 000 heures-tonnes. D'un coût de construction approximatif de 350 400 $, ce système permettra de réaliser des économies saisonnières de 43 525 $ et de récupérer l'investissement après 4,6 ans. Le coût du système se monte à 2,34 $ par heure-tonne d'énergie stockée. On a supposé que le terrain adjacent au bâtiment à refroidir pourrait contenir la masse de stockage et qu'un parc de stationnement pourrait y être aménagé en surface. Aussi, le coût de système ne comprend pas les frais d'acquisition du terrain ni les frais afférents au parc de stationnement. On trouve aussi deux autres projets de systèmes, un en climat froid comme celui d'Edmonton en Alberta (Canada) et un pour un climat modérément chaud comme celui de Springfield en Illinois (É.-U.).

ICE WATER BASINS USED AS A LATENT HEATSINK IN THE DAIRY INDUSTRY

UTILISATION DE LA CHALEUR LATENTE D'UN BASSIN D'EAU GELÉE DANS L'INDUSTRIE LATIÈRE

Bo Granström, ARLA
Peter Kjaerboe, VIAK AB
Vallingby, Sweden

To decrease the demand of power from cooling-compressors, an ice water basin can be installed. For pasteurizing of milk, a heat load and a cooling load occurs for three to five hours a day. For cooling, temperatures around the freezing point of the water are needed, so that water can easily be used as the storage medium.

The system simply consists of pipes spread out in a concrete basin.

ARLA has used such systems for approximately 30 years.

This paper will describe the components of the system, experiences of operation, and the costs as well as the saving in comparison to other systems.

The data and principles could probably be used when talking about freezing systems for heating by heat pumps, where lakes and rivers are used as the heat source.

Pour réduire la consommation d'énergie des compresseurs servant au refroidissement, on peut avoir recours à un bassin d'eau gelée. Pour la pasteurisation du lait, les besoins de chaleur et de refroidissement varient de 3 à 5 heures par jour. Pour le refroidissement, une température voisine de 0 °C est nécessaire, de sorte qu'on peut facilement utiliser l'eau comme moyen de stockage.

L'installation consiste simplement en tuyaux placés dans un bassin de béton.

L'ARLA utilise des installations semblables depuis environ 30 ans.

Cette note décrit les éléments de l'installation, les résultats de son exploitation ainsi que les coûts et les économies comparés à ceux d'autres installations.

Les données et les principes utilisés pourraient être employés pour le chauffage par pompe à chaleur utilisant l'eau des lacs ou des rivière comme source de chaleur.

ICE STORAGE SYSTEMS THAT COST LESS THAN CONVENTIONAL SYSTEMS --- A BREAKTHROUGH FOR BUILDING OWNERS

INSTALLATIONS DE STOCKAGE DE GLACE MOINS COÛTEUSES QUE DES INSTALLATIONS CLASSIQUES --- UNE DÉCOUVERTE INTÉRESSANTE POUR LES PROPRIÉTAIRES DE BATIMENTS

C. James Marquette
Baltimore Aircoil of Canada
Georgetown, Canada

Thermal storage for cooling is now widely recognized as a practical answer to the increasing costs of operating air conditioning systems. Ice storage in particular has emerged as the most practical method of generating and storing cooling capacity on a daily basis.

While many designers and building owners have shown interest in ice storage, implementation of this technology has been very limited, largely because ice storage systems have been higher in first cost than conventional, instantaneous cooling systems. As a result, ice storage systems have been installed only when the additional first cost was successfully justified on a life cycle cost basis. Experience has shown that special utility rates with time-differentiated demand and/or consumption charges are necessary to develop adequate operating cost savings and an attractive return on investment. While there is a definite trend among utility companies toward time-differentiated rates, their actual implementation has been slow.

In addition, the vast majority of building owners place first cost considerations above operating cost savings. As a result the use of ice storage will cease to be a curiosity and become a "mainstream" system only when it is competitive in first cost with conventional cooling systems.

Recent advances in heat transfer technology and equipment now permit engineers to design ice storage systems that are equal to or lower in first cost than conventional systems. The basic technology centers around the production of colder water to be supplied

Il est maintenant reconnu que le stockage thermique pour le refroidissement constitue une réponse valable aux coûts croissants d'exploitation des installations de conditionnement d'air. Le stockage de la glace en particulier, s'est révélé être la méthode la plus pratique pour la production et le stockage d'énergie de refroidissement sur une base quotidienne.

Bien que de nombreux concepteurs et propriétaires de bâtiments se soient montrés intéressés par le stockage de la glace, l'application de cette technique a été jusqu'ici très limitée, principalement parce que le coût initial d'investissement est supérieur à celui des installations traditionnelles de refroidissement instantané. Par conséquent, de telles installations n'ont été construites que lorsque les économies réalisables pendant toute la durée de vie utile justifiaient ce coût d'investissement supérieur. L'expérience a démontré que des tarifs d'électricité spéciaux (compteurs heures creuses) sont nécessaires si on veut réaliser des économies sur les coûts d'exploitation et amortir convenablement l'investissement. Bien que la tarification heures creuses ait tendance à se généraliser, son application a été lente jusqu'ici.

De plus, la grande majorité des propriétaires de bâtiments mettent la priorité sur le coût initial d'investissement plutôt que sur les économies réalisables sur les coûts d'exploitation. Par conséquent, le stockage de glace cessera d'être une curiosité et se généralisera lorsque son coût initial sera concurrentiel avec celui des installations de refroidissement traditionnelles.

De récents perfectionnements dans la technologie et le matériel de transfert thermique permettent maintenant aux ingénieurs de concevoir des installations de stockage de la glace dont le coût initial est égal ou inférieur à celui d'installations

to the air cooling and distribution equipment to achieve cost savings in these areas.

traditionnelles. La technologie de base porte principalement sur la production d'une eau plus froide pour l'alimentation du matériel de refroidissement et de distribution d'air.

In terms of operating costs, the new ice storage system has approximately one-half the connected load of a conventional system. Therefore the demand component of the utility bill is reduced proportionally. In addition, recent advances in ice storage equipment design now permit higher refrigeration system efficiencies, resulting in energy consumption comparable to conventional systems. Therefore, the total utility bill is less than for a conventional system, particularly when time-differentiated rates are implemented.

En termes de coûts d'exploitation, avec les nouvelles installations, l'énergie consommée est réduite d'environ la moitié. La partie de la facture correspondant donc au kWh consommés est réduite d'autant. De plus, des améliorations apportées récemment à la conception du matériel de stockage de la glace permettent maintenant d'obtenir un meilleur rendement des installations de réfrigération, ce qui se traduit par une consommation d'énergie comparable à celle d'installations traditionnelles. La facture d'électricité est donc inférieure à celle de ces dernières, surtout lorsqu'une tarification heures creuses est prévue.

This paper will include a generic description of the heat transfer equipment in this new generation of ice storage systems, and will identify those areas of the system where capital cost savings occur. An itemized cost comparison for a typical project will be included, as well as a comparison of the total connected load (demand) and annual energy consumption.

Ce document donne une description générale du matériel de transfert thermique utilisé dans cette nouvelle génération d'installations de stockage de la glace, et indique à quels endroits les principales économies d'investissement sont réalisées. Le document comprend également une comparaison des coûts ventilés pour un projet type, ainsi qu'une comparaison entre la consommation d'énergie totale et la consommation annuelle.

COOLING WITH ICE - CANADIAN PROGRESS

REFROIDISSEMENT PAR LA GLACE - PROGÈS RÉALISÉS AU CANADA

Edward Morofsky
Public Works Canada
Ottawa, Canada

The first Public Works Canada experiments in 1979 were aimed at developing an innovative seasonal ice storage technology for space cooling applications in medium-sized and larger buildings. The geographical range of application was defined almost solely by a winter climate having subfreezing temperatures for a sufficient time to enable the efficient production of large volumes of ice. Most of Canada and large areas of the United States fall within this range. The initial goals of the original experiment were to develop and perfect an automated, efficient ice freezing, storage, and utilization technique that did not require additional operating and maintenance costs; to determine the height of ice that could be produced as a function of location; and to design a standard modular approach that could be applied at any site in a cost-effective manner. A construction cost goal of approximately $150 to $200 (Cdn 1985) per cubic meter of ice was set for the system based on expected energy and chiller savings in comparison with conventional cooling techniques. The layer-by-layer method of building an ice block from the bottom up and an energy extraction technique based on direct contact between water and ice were employed from the beginning. A fully automated ice formation, storage, and utilization method has now been developed and tested over several years and applied to both building cooling and to the chilling of vegetable crops. Evaluation of the cost-effectiveness of specific design applications is now underway.

Les premiers essais effectués par Travaux publics Canada en 1979 visaient à élaborer des techniques originales de stockage saisonnier de la glace pour le refroidissement de moyens et de grands bâtiments. Les contraintes géographiques étaient définies presque exclusivement par la nécessité de disposer d'une période suffisamment longue de températures sous le point de congélation pour permettre la fabrication efficace de grandes masses de glace. Ce climat se retrouve dans la plus grande partie du Canada et dans de larges secteurs des États-Unis. Les objectifs des premiers essais ont d'abord été d'élaborer et de perfectionner des techniques efficaces de congélation de l'eau et de stockage et d'utilisation de la glace qui n'entraîneraient pas de coûts supplémentaires de fonctionnement et d'entretien; de déterminer la hauteur de la glace pouvant être produite en fonction de l'emplacement; et de concevoir un système modulaire qui pourrait être appliqué à n'importe quel emplacement de façon rentable. Le prix de fabrication visé se situait entre 150 et 200 $ (canadiens de 1985) par mètre cube de glace, en tenant compte des économies d'énergie et d'installations prévues par rapport aux techniques classiques de refroidissement. Dès le début, on a employé la méthode "couche par couche" pour fabriquer le bloc de glace de bas en haut, ainsi qu'une technique d'extraction de l'énergie fondée sur le contact direct de l'eau et de la glace. Une méthode complètement automatisée de fabrication, de stockage et d'utilisation de la glace a été mise au point et éprouvée sur plusieurs années; elle a été appliquée au refroidissement des bâtiments et à la réfrigération des légumes. On s'attache maintenant à évaluer la rentabilité de conceptions particulières.

ICE PRODUCTION USING AMBIENT WINTER TEMPERATURES

PRODUCTION DE GLACE À L'AIDE DES TEMPÉRATURES AMBIANTES HIVERNALES

Clément Vigneault and Marc Lemieux
Agriculture Canada,
Ottawa, Canada

For the past three years, Agriculture Canada has been working to produce a block of ice using the coldness of outdoor air.

A block was produced by superimposing successive layers of ice. A totally automatic production system has been developed, and water and air distribution systems were developed and tested on a large scale.

A sensor was devised to determine the height of the ice. This sensor controls an automatic pumping system that maintains the air and water distribution circuits at an optimal height.

Agriculture Canada travaille depuis trois ans dans le domaine de la fabrication d'un bloc de glace à partir du froid de l'air extérieur.

Le principe de fabrication consiste en une superposition de couches successives de glace. Un système de fabrication entièrement automatique a été développé. Des systèmes de distribution d'eau et d'air ont été développés et testés à grande échelle.

Un senseur permettant de déterminer la hauteur de la glace a été développé. Ce senseur contrôle un système de relevage automatique qui maintient les circuits de distribution d'air et d'eau à une hauteur optimum.

PRECOOLING VEGETABLES USING A BLOCK OF ICE PRODUCED BY WINTER COOLNESS

PRÉRÉFRIGÉRATION DES LÉGUMES AU MOYEN D'UN BLOC DE GLACE OBTENU EN UTILISANT LE FROID HIVERNAL

Clément Vigneault, Agriculture Canada
Ottawa, Canada

Jacques Gallichand, Guy Jacob
Roche Associés Ltée, Ste-Foy, Canada

A 250-ton block of ice was made using winter coldness by superimposing successive thin layers of ice.

This block of ice was stored in an insulated building and was used to precool vegetables. The results obtained were compared with those of a conventional water-based precooling system powered by a compressor.

The quality of the water and the produce, the energy efficiency and economic aspects of both systems were compared. The results demonstrated that the system using the block of ice as a cold source had definite advantages. However, certain parts of the system, such as the recirculation of the water flow onto the ice, must be improved.

Un bloc de glace de 250 tonnes a été fabriqué à partir du froid de l'hiver par superpositions successives de minces couches de glace.

Ce bloc de glace a été conservé dans une bâtisse isolée et il a été utilisé pour le prérefroidissement des légumes. Les résultats obtenus avec ce système sont comparés avec ceux d'un système de prérefroidissement conventionnel à l'eau alimenté par un compresseur.

La qualité de l'eau et des produits, et les performances énergétiques et économiques sont comparés pour les deux systèmes. Les résultats obtenus démontrent des avantages certains pour le système incorporant un bloc de glace comme source froide. Certaines parties du système demandent toutefois à être optimisées, tels les débits d'eau à recirculer sur la glace.

SYSTEMS/
SYSTEMES

Tom LeFeuver, B.Eng., Ph.D.
Division of Energy
National Research Council of Canada
Ottawa, Canada

TECHNICAL AND ECONOMIC FEASIBILITY OF CENTRAL SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL STORAGE

FAISABILITÉ TECHNIQUE ET ÉCONOMIQUE DES CENTRALES DE CHAUFFAGE SOLAIRE AVEC STOCKAGE SAISONNIER

Charles A. Bankston
Charles A. Bankston, Inc.
Washington, D.C., U.S.A.

A unified analysis and parametric study of CSHPSS Systems has recently been compiled by the eight-nation Subtask II (b) group of the IEA Solar Heating and Cooling Programs Task VII. The study culminated nearly three years of information collection, evaluation, preliminary design and analysis, and system simulation. It included systems with stationary and tracking collector arrays; water tank, rock cavern, water pit, drilled earth and rock fields, and natural aquifers storage subsystems; heat pump and direct coupled loads, and loads representing 50 to 5000 residential units with domestic hot water fractions ranging from 20 to 50%. Each configuration was independently optimized using the Swedish IEA-developed computer code MINSUN. Results of the unified study indicate that a number of CSHPSS configurations are economically competitive with conventional plants now and are clearly economically superior to diurnal solar systems. Additional studies are now in progress that will verify these findings in the context of specific national economies and climates.

Le sous-groupe de travail II (b) regroupant huit nations et relevant du groupe de travail VII de l'AIE - Programmes de refroidissement et de chauffage solaire, a récemment effectué une analyse unifiée et une étude des paramètres des centrales de chauffage solaire. L'étude vient mettre fin à près de trois ans de travaux qui ont porté sur la saisie de données, l'évaluation, la conception, l'analyse préliminaire et la simulation des installations. Elle traite des installations avec batterie de capteurs fixes et à poursuite du soleil, des réservoirs de stockage d'eau, stockage en cavité rocheuse, en puits, en forage dans le sol et le roc et en aquifère, des pompes à chaleur, des charges directes mixtes et des charges représentant de 50 à 50 000 logements où l'eau chaude sanitaire représente 20 à 50 % du total. Chaque modèle a été optimisé de façon indépendante par le programme informatique MINSUN mis au point par l'AIE en Suède. Les résultats de cette étude ont révélé qu'un certain nombre d'installations peuvent soutenir la concurrence avec les installations traditionnelles et qu'elles sont économiquement très supérieures aux systèmes solaires diurnes. Des études sont en cours pour déterminer l'applicabilité de ces résultats en fonction de critères économiques et climatologiques nationaux.

CENTRAL SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL STORAGE AN INTERNATIONAL FEASIBILITY STUDY

INSTALLATIONS DE CHAUFFAGE CENTRAL SOLAIRE AVEC STOCKAGE SAISONNIER ÉTUDE INTERNATIONALE DE FAISABILITÉ

Arne Boysen
Bengt Hidemark Gösta Danielson Arkitektkontor HB
Stockholm, Sweden

For northern countries solar heating of buildings seems to be an unrealistic proposition - when heat is needed most in winter there is practically no solar radiation to utilize. Long-term storage of heat has to be employed, and the economics of such a system will necessarily be uninteresting - or so it seems to many people.

In reality, however, the problem is much more complicated, and 10 countries therefore decided to investigate the cost-effectiveness of central solar heating plants with seasonal storage. The work started in 1980 as Task VII of the Solar Heating and Cooling Programme within the International Energy Agency, and some very interesting results are now being reported. Seasonal storage is a realistic concept. It has a wide applicability for utilization of waste heat or cheap energy rates during certain parts of a year, and it is not limited to solar energy. In fact, solar energy may in some cases be a second alternative, to be used when cheaper energy is no longer available.

Task VII however set out to investigate a system with a major part of solar energy (approximately 80%), and distributing the energy as sensible heat in water. The storage concept was also based on sensible heat in water, but quite soon also included those storage concepts where the ground itself, be it rock or clay, is used as the storage medium.

Dans les pays nordiques, le chauffage solaire des locaux ne semble pas être une solution réaliste : en effet, c'est en hiver, où l'on a le plus besoin de chaleur, que le rayonnement solaire est presque inexistant. Il faut donc recourir au stockage à long terme de la chaleur, ce qui apparaît à bon nombre de gens comme une solution nécessairement coûteuse.

Toutefois, le problème est beaucoup plus complexe dans la réalité. Dix pays ont donc décidé d'étudier la rentabilité des installations de chauffage central solaire avec stockage saisonnier. Les travaux ont débuté en 1980 sous le nom du Groupe de travail VII du Programme de chauffage et de refroidissement solaires de l'Agence internationale de l'énergie, et des résultats très intéressants nous sont actuellement communiqués. Le stockage saisonnier est un concept réaliste d'application étendue, partant de l'utilisation des rejets de chaleur ou de tarifs réduits d'énergie pendant certaines parties de l'année, qui ne se limite pas à l'énergie solaire. En fait, l'énergie solaire peut, dans certains cas, être utilisée lorsque l'énergie bon marché a disparu.

Les membres du Groupe de travail VII ont toutefois entrepris l'étude d'un système alimenté en grande partie à l'énergie solaire (environ 80 %) dans lequel la distribution de l'énergie se fait à partir de chaleur sensible dans l'eau. Le concept du stockage était également basé sur la chaleur sensible dans l'eau, mais on y ajouta bien vite les autres théories de stockage où le sol lui-même, qu'il s'agisse de roc ou d'argile, servirait de milieu de stockage.

SEASONAL STORAGE OF HEAT FOR DISTRICT HEATING IN SWEDEN

STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR SERVANT AU CHAUFFAGE URBAIN EN SUÈDE

Hans Sabel
The Swedish District Heating Association
Stockholm, Sweden

Municipalities are assuming a central role in Sweden's energy planning. This role will be expanded in the future and will comprise overall consideration to energy supply as well as utilisation. Increased understanding of heat storage techniques may provide access to an additional energy alternative.

Les municipalités jouent un rôle central dans la planification énergétique en Suède et leur participation sera encore plus importante à l'avenir car elle portera sur les sources d'énergie et leur utilisation. Une connaissance plus approfondie des techniques de stockage thermique pourra fournir des solutions nouvelles.

Due to climatic conditions, the heat demands in the winter and summer are radically different. The opposite may be true of the availability of energy. Heating plants are rated for extreme winter conditions. In addition to being rated for meeting the climate-related space heating demands, the heat supply systems must also be rated for the maximum domestic hot water demand. The energy supply systems must transmit large energy flows and high instantaneous powers. The latter are often decisive to the rating.

Les besoins en chauffage sont très différents en hiver et en été en raison des conditions climatiques. Par contre la disponibilité de l'énergie est à l'inverse des besoins. Le rendement des centrales de chauffage est établi en fonction des conditions climatiques de l'hiver. Les installations de chauffage doivent pouvoir répondre à la demande de chauffage des locaux ainsi qu'à la demande maximale d'eau chaude sanitaire. Les réseaux d'alimentation doivent fournir d'importants flux énergétiques et des puissances instantanées élevées. Cette dernière caractéristique est souvent déterminante pour l'établissement de la puissance de l'installation.

Out of the various energy supply systems employed in Sweden, district heating is responsible for roughly 50% of the space heating requirements. This proportion is expected to increase to approximately 70% by 1995. The expansion is subsequently expected to taper off.

En Suède, près de 50 % de la demande de chauffage des locaux est satisfaite par les réseaux de chauffage urbain. On prévoit que cette proportion atteindra environ 70 % d'ici 1995. La croissance diminuera par la suite.

About 95% of the energy from raw materials used for heat generation in district heating systems consisted of imported fuel oil. An oil replacement program initiated by the State has so far resulted in the proportion of oil-based district heating systems now having dropped to about 50%.

Le mazout importé a constitué environ 95 % des combustibles utilisés par le chauffage urbain. Un programme national de remplacement du mazout a permis de réduire à 50 % la part du mazout dans les installations de chauffage urbain.

At some future date, it is estimated that only 10 - 20% of the heat generated will be oil-based. In addition to the demand being restricted by energy conservation in built-up areas, fuel oil is being replaced by alternative energy sources, such as coal,

On estime qu'à l'avenir le mazout ne sera utilisé que dans une proportion d'environ 10 à 20 % pour le chauffage. En plus des programmes d'économies d'énergie dans les agglomérations, on remplace le mazout par d'autres sources comme le charbon, les

municipal refuse, domestic fuels, electric power, waste heat and low-temperature energy sources combined with heat pumps.

Plants fired with solid fuels are capital-intensive, and efforts are therefore being made to design them for long utilisation times and low powers. A rule of thumb is that a plant designed for about 40% of the maximum demand covers about 75% of the annual energy demand. Peaks in demand and stand-by capacity are still covered by expensive oil.

District heating has a relatively long tradition and is widely employed in Sweden. Since the end of the 1940s, district heating systems have been built in approximately 140 municipalities. New techniques, such as heat pumps, could easily be introduced into the district heating systems. Energy storage may be an attractive future alternative in the energy supply of the municipalities. This claim is based on the favourable experience of the demonstration plants built so far. The benefits that could be achieved are as follows:

- evening-out of the variations in load reduced investments
- utilisation of temporary surpluses of energy reduced fuel consumption
- creation of temporary heat drops increased electric power generation
- utilisation today of the energy which is only available during the summer.

The aim of this lecture is to illustrate how the energy storage technique may find large-scale applicatin in district heating plants designed in accordance with the "Swedish model". Many of the conclusions drawn are also applicable to other centralised heat supply in Sweden, known as the group station technique.

déchets municipaux, les combustibles domestiques, l'électricité, la chaleur récupérée et les sources d'énergie basse température combinées avec les pompes à chaleur.

Les centrales à combustibles solides exigent des investissements importants et c'est pourquoi on tente d'en maximiser les durées d'utilisation et d'en réduire la puissance. On a établi de façon empirique qu'une installation conçue pour répondre à environ 40 % de la demande maximale satisfait généralement à environ 75 % de la demande énergétique annuelle. On utilise toujours le mazout pour les pointes et comme combustible d'appoint.

Le chauffage urbain est utilisé depuis assez longtemps en Suède. Ainsi, depuis la fin des années 40, environ 140 municipalités l'ont adopté. De nouvelles techniques telles les pompes à chaleur peuvent facilement être intégrées aux installations existantes. Le stockage d'énergie constitue une solution attrayante pour les municipalités, et ce grâce aux résultats probants des installations pilotes construites jusqu'à maintenant. Voici les avantages qui pourraient en découler:

- nivellement des variations de la demande réduction des coûts
- utilisation de surplus temporaires d'énergie réduction de la consommation en combustible
- création de chutes thermiques temporaires augmentation de la production d'énergie électrique
- utilisation actuelle d'énergie disponible seulement en été.

Cet exposé a pour but d'illustrer le rôle des techniques de stockage de l'énergie dans les installations de chauffage urbain conçues selon le "modèle suédois". Plusieurs des conclusions s'appliquent aussi à d'autres installations centrales de chauffage en Suède.

HEAT STORAGE R & D IN THE NETHERLANDS

RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT PORTANT SUR LE STOCKAGE DE CHALEUR AUX PAYS-BAS

G.J. van Mourik
Management Office For Energy Research
Utrecht, The Netherlands

Recently, the management structure of the R & D programmes on energy conservation and renewables in the Netherlands has been changed. In this paper the new structure will be explained.

Growing interest in energy storage has caused an increase in funds for R & D in this field. The Dutch storage programme, with emphasis on the following three concepts, will be described in this paper. Tentative results will be discussed.

One of the main goals is the development of heat storage systems. Two devices, concerning heat storage in the ground, are studied: the closed system (heat exchanger in the ground) and the open system (aquifers). A full scale demonstration plant of the closed system (in the city of Groningen) is in operation now. On different opportunities this project has been presented. The latest results are presented in another paper. So more information is superfluous. The aquifer storage system is carefully studied at the moment. This paper will give an overview of the different aspects, studied at the moment, the tentative results and the available funds. Also demonstration plants carried out or in preparation will be mentioned.

A second goal is the development of electrical and mechanical energy storage concepts. Three possibilities are compared. The first one is an artificial lake (built within an existing lake) with a waterlevel about twelve meters higher than the surrounding waterlevel. In off-peak hours the waterlevel in the artificial lake is pumped up, so that hydro-power is available in peak hours. The second one consists of

Récemment, la structure de gestion des programmes de R & D en conservation de l'énergie et en énergie renouvelable aux Pays-Bas a été modifiée. Dans ce document, la nouvelle structure est expliquée en détail.

L'intérêt grandissant pour le stockage d'énergie s'est traduit par une augmentation des fonds de R & D dans ce domaine. Le programme hollandais de stockage porte tout spécialement sur les trois concepts suivants qui seront décrits plus loin dans ce document. Les résultats obtenus seront ensuite analysés.

L'un des principaux objectifs est la mise au point d'installations de stockage de la chaleur. Deux dispositifs pour le stockage de la chaleur dans le sol sont à l'étude: une installation en circuit fermé (échangeur de chaleur dans le sol) et une installation en circuit ouvert (aquifère). Une centrale de démonstration en vraie grandeur d'une installation à circuit fermé (dans la ville de Groningen) fonctionne actuellement. Ce projet a été présenté à différentes occasions. Les derniers résultats figurent dans un autre document. Il n'est donc pas nécessaire de présenter ici ces informations. Une installation de stockage en aquifère est à l'étude en ce moment. Ce document donnera un aperçu général des différents aspects de l'étude et des résultats déjà obtenus ainsi que des fonds disponibles. D'autres centrales de démonstration en construction seront mentionnées.

Le second objectif est la mise au point de concepts de stockage d'énergie électrique et mécanique. Trois possibilités sont comparées. La première est un lac artificiel (construit à l'intérieur d'un lac existant) dont le niveau d'eau est d'environ 12 mètres au-dessus des eaux voisines. En-dehors des heures de pointe, on élève par pompage le niveau de l'eau dans le lac artificiel de sorte qu'on puisse récupérer l'énergie ainsi

two water reservoirs, one above and one underground, working like the artificial lake storage. The third possibility is CAES. The geological situation in the Netherlands is in favour of CAES in aquifers. Only hybrid CAES/TES systems and adiabatic CAES/TES systems are studied.

Although not storage, geothermal energy can be mentioned here because of the relation with heat storage in aquifers. The first phase of the geothermal energy programme in the Netherlands has finished. A demonstration project was proposed, but cancelled because of the high technical risks. A limited programme in order to eliminate some uncertainties will be carried out.

accumulée au cours des heures de pointe. Le second comprend deux réservoirs d'eau, l'un au-dessus du sol, l'autre enterré, fonctionnant comme le lac artificiel. La troisième possibilité est un CAES. La géologie des Pays-Bas favorise les CAES en aquifère. Seules les installations CAES/TES hybrides et les installations adiabatiques CAES/TES sont à l'étude.

Bien qu'il ne s'agisse pas de stockage, on peut mentionner ici l'énergie géothermique en raison de sa relation avec le stockage de chaleur en aquifère. La première phase du programme d'énergie géothermique des Pays-Bas vient de s'achever. Un projet de démonstration a été proposée mais il a été annulé à cause des risques techniques encourus. Un programme limité visant à éliminer certaines incertitudes sera donc entrepris.

STUDY OF COOL STORAGE USING REFRIGERANT GAS HYDRATE

ÉTUDE SUR LE STOCKAGE DE FROID AVEC UN HYDRAGE GAZEUX COMME RÉFRIGÉRANT

T. Akiya, M. Owa, M. Nakaiwa and S. Kawasaki
National Chemical Laboratory for Industry, Yatabe, Ibaraki, Japan
Y. Ishibashi and Y. Ando
Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., Chiyoda-ku, Tokyo, Japan

The aim of this study is to obtain basic data to develop a cool storage system which shifts the electrical demand for residential air-conditioning to off-peak periods.

First, pressure-temperature phase diagrams of refrigerant gas hydrates of Freon-22, Freon-21, Freon-12 and R-11 were determined. From the phase diagrams, the critical decomposition conditions and heats of formation were determined.

Tests of formation-decomposition of gas hydrates were also carried out. From the results of the tests, it was found that the degree of supercooling of formation depended on the previous heat treatment of the refrigerant-water mixtures.

Le but de cette étude est d'obtenir les données essentielles pour mettre au point une installation de stockage du froid capable de réduire les pointes de demande de climatisation des habitations résidentielles.

D'abord on a tracé les diagrammes de phase pression-température du Fréon-22, Fréon-21, Fréon-12 et R-11 (hydrates gazeux réfrigérants). À partir de ces diagrammes de phase les conditions critiques de décomposition et les chaleurs latentes de formation ont été déterminées.

Des essais de formation et de décomposition des hydrates gazeux ont également été effectués. D'après les résultats de ces essais, on a constaté que le surrefroidissement à la formation dépendait du traitement thermique antérieur des mélanges réfrigérant-eau.

INTEGRATED THERMAL STORAGE IN ENERGY SYSTEMS FOR CANADIAN LOW ENERGY HOUSES

STOCKAGE THERMIQUE INTÉGRÉ DANS LES MAISONS CANADIENNES À HAUT RENDEMENT ÉNERGÉTIQUE

Greg Allen and Mario Kani
Allen Drerup-White Ltd.
Toronto, Canada

As space heating loads are substantially reduced in low energy houses, other loads such as domestic hot water (DHW) heating and space cooling become the largest energy demands. Indoor air DHW heat pumps (with COP's 2.5-3.0) benefit from storage of excess gains. The use of continuously operating exhaust air heat pumps for providing intermittent space and DHW heating, and heat recovery as well as continuous ventilation, already popular in Scandinavian countries, is increasing.

The use of advanced energy conserving housing technologies, such as Superwindows with insulation values of RSI 1.0 or more, allow the lowering of building envelope losses, thus retaining more of the free or low cost heat contributions to the living space (i.e. solar gains, internal gains, wood heat). For comfort control and energy cost savings the opportunity exists to mechanically integrate HVAC functions with thermal storage. This paper describes the design and predicted performance of a multi-functional integrated mechanical system for low energy houses that is capable of providing space heating and cooling, DHW heating, grey water heat recovery and continuous ventilation with exhaust air heat recovery. Excess heat is used to melt a small ice storage tank, which in turn is kept cold by a heat pump transferring energy to a hot water tank (which provides DHW and hydronic space heating).

The integrated mechanical system has been analysed for use in a state-of-the-art passive solar low energy house. This house, to be constructed in 1986, incorporates

Comme le chauffage est réduit dans les maisons à haut rendement énergétique, la demande d'eau chaude sanitaire (DHW) et celle de la climatisation deviennent relativement importantes. Les pompes à chaleur (avec un COP de 2.5-3.0) fonctionnant avec l'air intérieur bénéficient d'un stockage du surplus d'énergie. L'utilisation continue de pompes à chaleur pour récupérer la chaleur de l'air extrait permet un chauffage intermittent des locaux et de l'eau chaude sanitaire. La récupération de chaleur ainsi que la ventilation continue, déjà populaire dans les pays scandinaves, devient donc de plus en plus fréquente.

L'application de nouvelles technologies de conservation de l'énergie dans les logements, comme par exemple l'installation de superfenêtres ayant des valeurs RSI de 1.0 ou davantage réduit considérablement les pertes de chaleur par l'enveloppe; ce qui permet de conserver la chaleur produite à un faible coût ou gratuite dans les espaces habités (gains solaires directs, gains internes, combustion du bois). Pour réaliser des économies d'énergie et contrôler la température, il est possible d'ajouter un stockage thermique. Ce document décrit la conception et prédit le rendement d'une installation intégrée à fonctions multiples pour les maisons à haut rendement énergétique qui peut assurer le chauffage et le refroidissement des locaux, l'eau chaude sanitaire et récupérer la chaleur des eaux usées et de l'air extrait de façon continue. Le surplus de chaleur fait fondre la glace dans un petit réservoir qui est refroidi par une pompe à chaleur. Celle-ci produit l'énergie nécessaire au réservoir d'eau qui alimente le réseau de distribution d'eau chaude sanitaire et les radiateurs à eau chaude.

Cette installation intégrée a été conçue pour une maison solaire passive à haut rendement énergétique. La maison expérimentale qui doit être construite en 1986 comprend des

Superwindows, high insulation levels (ceiling 10.0, walls RSI 7.0, floor RSI 4.0), new airtightness and framing techniques and an unheated attached sunspace (which also preheats the ventilation air). The central feature is a "Rumford-Contraflow" masonry wood heater. Any wood heat, solar and internal gains are delivered to storage via exhaust air heat recovery and the space cooling function. Space heating is delivered from hydronic radiant ceiling panels, allowing the use of a lower indoor setpoint while maintaining equivalent comfort.

Detailed hour-by-hour computer simulations using the ENERPASS program were performed and results are presented as annual heating load and energy consumptions, and summer and winter temperature profiles. Energy use, when compared to a house built to National Building Code Standards with electrical resistance heating, was over 10 times lower, resulting in an energy cost of less than $100 for space and DHW heating, in addition to "free" space cooling.

The energy, comfort and architectural benefits of this integrated mechanical system and other, less sophisticated systems are outlined and cost implications studied. With the R-2000 program becoming more popular, such energy systems are increasingly being employed to significantly reduce the total energy use in Canadian houses.

superfenêtres, une hyper isolation (RSI plafond 10.0, murs 7.0, planchers 4.0). Elle fait appel à de nouvelles techniques d'ossature et d'étanchéité à l'air et comprend un espace chauffé uniquement par le rayonnement solaire et qui sert au préchauffage de l'air de ventilation. Le pivot de l'installation est une cheminée du type "Rumford-Contraflow" en maçonnerie pour la combustion du bois. La combustion du bois et les gains solaires et internes permettent de stocker de la chaleur en récupérant celle-ci de l'air extrait et du conditionnement d'air. Le chauffage de la maison provient de radiateurs à eau chaude situés dans le plafond, ce qui permet d'abaisser la température de consigne à l'intérieur pour un confort équivalent.

Des simulations détaillées heure par heure au moyen du programme ENERPASS ont été effectuées. Les résultats présentés ici indiquent le besoin de chauffage annuel et les consommations d'énergie ainsi que les profils des températures d'été et d'hiver. Par comparaison avec une maison construite selon les normes du Code national du bâtiment et ayant un chauffage électrique à résistances l'installation a consommé 10 fois moins d'énergie ce qui a réduit le coût de l'énergie à 100.00 $ pour le chauffage et l'eau chaude, en plus de fournir gratuitement la climatisation.

On a étudié en détail les bénéfices que l'on peut tirer de cette installation pour le confort, la consommation d'énergie et l'architecture en le comparant à des installations moins sophistiquées. Avec le programme R-2000 qui devient de plus en plus populaire, ces installations sont de plus en plus courantes pour réduire la consommation d'énergie dans les maisons au Canada.

NEW PHASE CHANGE THERMAL ENERGY STORAGE MATERIALS FOR BUILDINGS

NOUVEAUX MATÉRIAUX DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE THERMIQUE PAR CHANGEMENT DE PHASE POUR LES BÂTIMENTS

D.K. Benson, C.B. Christensen, R.W. Burrows and Y.D. Shinton
Solar Energy Research Institute
Golden, U.S.A.

A new class of phase change thermal energy storage materials is under development at SERI. These materials are unusual in two ways. They reversibly absorb large amounts of heat during a solid-state, crystal transformation more than 70°C below their melting temperatures, and their solid-state transformation temperatures may be adjusted over a range from 7°C to 188°C by varying the ratios of binary mixtures of the components.

Because these storage materials remain solid throughout the range of their service temperatures, unique opportunities exist for incorporating them into building materials. Composites have been made with ordinary, porous construction materials such as wood, gypsum board, and lightweight concrete as the matrix and with the solid-state phase change materials (SS PCM) filling the void space. The thermal storage capacities of such composites are thereby increased by more than 100% without changing the basic nature and workability of the matrix, construction material.

The SS PCM's are low molecular weight polyalcohols from the homologous series $C_5H_{12}O_x$ (where x ranges from 0 to 4). These materials derive their unusual thermal behavior from their tetrahedral molecular shape and the resonant hydrogen bonding that occurs between neighboring molecules in the crystal structure. These compounds are presently used in the manufacture of resin paints, munitions, and synthetic lubricants and are mass-produced (more than 100 million pounds per year in the USA) at a cost of less than $1.00 per pound.

The thermal properties and the basic mechanisms of the solid-state transformations

Une nouvelle catégorie de matériaux de stockage de l'énergie thermique par changement de phase est à l'étude à l'institut de recherche en énergie solaire. Ces matériaux ont deux caractéristiques particulières. Ils absorbent et peuvent restituer de grandes quantités de chaleur lors d'une transformation cristaline à plus de 70 °C en-dessous de leur température de fusion et les températures de transformation à l'état solide peuvent être modifiées de 7 °C à 188 °C en changeant les proportions du mélange binaire.

Comme ces matériaux restent à l'état solide aux températures d'utilisation, il serait facile de les incorporer aux matériaux de construction. Certains composés ont été fabriqués avec des matériaux de construction poreux ordinaires tels que le bois, les panneaux de plâtre et le béton léger remplis du matériau solide changeant de phase (SSPCM). Les capacités thermiques de ces matériaux ont ainsi pu être augmentées de plus de 100 % sans changer leurs caractéristiques ni leur mise en oeuvre.

Les SSPCM sont des polyalcools de faible poids moléculaire provenant de la série $C_5H_{12}O_x$ (avec x variant de 0 à 4). Ces matériaux ont un comportement thermique inhabituel à cause de leur structure moléculaire tétrahédrique et de la liaison de résonance par l'hydrogène qui s'exerce entre molécules voisines dans la structure cristalline. Ces composés sont actuellement utilisés pour la fabrication de peintures-résines, de munitions et de lubrifiants synthétiques. Ils sont produits en grandes quantités (plus de 100 millions de livres par an aux États-Unis) à un coût inférieur à 1,00 $ la livre.

Les caractéristiques thermiques et les mécanismes de base des transformations à

have been studied at SERI. In addition, parametric analyses have been conducted to determine what combination of properties would be optimum for certain solar and energy conserving building applications including Trombe wall, direct gain sun space, and distributed cool storage (combined with night ventilation) to reduce air conditioning requirements of the core space in commercial buildings.

These results will be presented and remaining technical issues will be discussed.

l'état solide ont été étudiés à l'institut de recherche en énergie solaire. De plus, les études des paramètres ont permis de déterminer des combinaisons de caractéristiques optimales pour la conservation de l'énergie et l'utilisation de l'énergie solaire dans les bâtiments, notamment pour les murs Trombe, les espaces sujets à un gain solaire direct et le stockage de réfrigérant (combiné avec la ventilation de nuit) pour réduire les besoins en climatisation des parties centrales des bâtiments commerciaux.

Les résultats seront présentés à la conférence et les principaux points techniques y seront discutés en détail.

THE LYCKEBO ROCK CAVERN SEASONAL STORAGE PLANT: EXPERIENCE OF ONE YEAR OF OPERATION

CENTRE DE STOCKAGE SAISONNIER DE LA CAVERNE DE LYCKEBO: UN AN D'EXPLOITATION

C. Frunström and M. Larsson, Swedish State Power Board, Alvkarleby, Sweden
P. Holst and H. Zinko, Studsvik Energiteknik AB, Nyköping, Sweden
C-G Hillström, VIAK AB, Falun, Sweden

The local solar district heating plant at Lyckebo, 13 km north of Uppsala Sweden, has been in operation since the summer of 1983. The system supplies 550 dwellings with energy for space heating and domestic hot water from a rock cavern seasonal storage. The main parts of the system are the solar collector field with 4320 m2 of high efficient flat plate collectors, a rock cavern seasonal storage of 100 000 m3 and a local low temperature distribution system. The maximum temperature of the distribution system varies between 70°C during the winter and 50°C during the summer. The cavern water is stratified with the temperature varying between 90 and 40°C. The uninsulated cavern is designed as an annulus ring and is operated with movable inlet and outlet pipes. The solar collectors installed represent only 15 percent of the required collector area. The remaining 85 percent is simulated by a 6 MW electric boiler.

This paper presents results of one year of operation. A monthly energy balance is given for the period from 1 April 1984 to 31 March 1985. An analysis of the influences of collector field control strategy and of storage heat losses on the storage efficiency is given. Temperature profiles for the storage water during the year will be shown. The development of these profiles is discussed from a knowledge of the temperatures of the loaded and unloaded water. Finally all data are summarized to yearly energy and temperature efficiencies of the storage.

No serious problems with the operation of the plant have occured. The results obtained so far indicate a high system performance with an annual energy production of the collectors of 310 KWh/m2 at a mean loading temperature to the rock cavern of 67°C (mean collector operating temperature of 62°C). The storage

La centrale solaire de chauffage urbain de Lyckebo située à 13 km au nord d'Uppsala, en Suède, fonctionne depuis l'été 1983. L'installation dessert 550 logements et fournit le chauffage et l'eau chaude en utilisant une cavité rocheuse pour le stockage saisonnier d'énergie. Les principaux éléments comprennent un champ de 4 320 m^2 de capteurs plans à haut rendement, un stockage saisonnier dans une cavité rocheuse de 100 000 m^3 et un réseau de distribution à basse température. La température maximale du réseau de distribution varie de 70 °C en hiver à 50 °C en été. L'eau souterraine est stratifiée avec des températures variant de 40 à 90 °C. Les parois ne sont pas isolées, la caverne est en forme d'anneau et comporte des tuyaux branchés à l'entrée et à la sortie. Les capteurs solaires installés représentent seulement 15 % de l'aire réelle. Les 85 % restant sont simulés par une chaudière électrique de 6 MW.

Ce document donne les résultats de la première année de fonctionnement et un bilan énergétique mensuel pour la période s'étendant du 1er avril 84 au 31 mars 1985. Il contient aussi un étude des influences de la stratégie d'exploitation des capteurs et des pertes de chaleur du stockage sur le rendement de ce dernier. Les profils de température de l'eau du stockage au cours de l'année sont représentés. L'évolution de ces profils est analysée à partir des températures de l'eau au stockage et au déstockage. Finalement, toutes les données figurent dans un résumé indiquant les rendements énergétiques et les températures annuelles du stockage.

Aucun problème sérieux de fonctionnement de la centrale ne s'est produit. Les résultats obtenus jusqu'à maintenant indiquent un excellent rendement de l'installation avec une production annuelle d'énergie de 310 KWh par mètre carré de capteur à une température moyenne de stockage de 67 °C (la température

has shown a well developed stratification but higher heat losses than expected. The losses for the period from 1 April 1984 to 31 October 1984 amounts to 2400 MWh corresponding to 28 percent of the total energy production. Losses are expected to decrease considerably during the following years.

It can be concluded that effective production and storage of solar energy is possible with high efficiency flat plate collectors connected to a rock cavern seasonal storage.

moyenne de fonctionnement des capteurs est de 62 °C). Le stockage s'est stratifié comme prévu mais les pertes de chaleur ont par contre été plus fortes (du 1er avril 1984 au 31 octobre 1984 elles ont été de 2 400 MWh, soit 28 % de l'énergie totale produite). Elles devraient diminuer considérablement au cours des prochaines années.

On peut conclure que la production et le stockage d'énergie solaire sont possibles avec un système comprenant des capteurs solaires plans à haut rendement reliés à un stockage saisonnier dans une cavité rocheuse.

ANALYSIS OF A THERMOCHEMICAL ENERGY STORAGE SYSTEM WITH LIQUID ABSORBENTS

ANALYSE D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMO-CHIMIQUE DANS DES LIQUIDES ABSORBANTS

A.H. Bugaj
Technical University of Wroclaw, Wroclaw, Poland
E. Hahne
University of Stuttgart, Stuttgart, F.R.G.

The final goal of this project is to construct and operate a seasonal heat storage which would be suitable for waste heat and solar energy systems using liquid absorbents as a thermochemical storage medium.

L'objectif final de ce projet est de construire et d'exploiter un stockage de chaleur saisonnier convenant à la chaleur récupérée aussi bien qu'aux installations de chauffage solaire et utilisant des liquides absorbants comme milieu de stockage thermo-chimique.

The liquid absorbent/water system has been considered as a suitable solution for this kind of heat storage, because it possesses several advantages compared with other storage methods, i.e. higher energy densities than water, pebble bed or solid absorbent; there is no thermal degradation of the stored energy and the liquid could be easily manipulated and stored.

Le système utilisant une solution de liquide absorbant et d'eau est considéré le plus approprié pour ce type de stockage de chaleur parce qu'il possède plusieurs avantages par rapport à d'autres méthodes de stockage. Cette solution a une capacité d'absorption d'énergie plus élevée que celle de l'eau, des lits de galets ou des matériaux absorbants liquides; il n'y a pas de dégradation thermique de l'énergie stockée et le liquide peut être facilement transvasé et stocké.

The first approach to the subject has been a formulation of the model of simultaneous heat and mass transfer process occurring in the system. The transfer coefficients have been obtained experimentally and introduced into the model.

La première approche a été la définition d'un modèle du procédé de transfert simultané de chaleur et de masse utilisé dans le système. Les coefficients de transfert ont été obtenus expérimentalement et incorporés au modèle.

In the next stage of the study, an overall simulation model of the system for all modes of operation has been considered. The analysis of the system is presented in the form of parametric studies.

À l'étape suivante du projet, un modèle de simulation globale du système pour tous les modes de fonctionnement a été élaboré. L'analyse du système est présentée sous forme d'études paramétriques.

During heat discharging operation the optimized energy turnover can easily exceed the value of 95%. Thus, the thermal losses of storage are virtually non-existent.

Pendant l'opération de restitution de chaleur, le rendement énergétique optimal peut facilement dépasser 95 %, les pertes de chaleur du stockage sont donc presque nulles.

The efficiency and energy storage density of the liquid absorbent/water system depends on the chosen operating concentrations of absorbent which in turn depend on the input, output, charging and discharging temperatures. Energy storage density ranges up to 1000 kJ/kg of solution.

L'efficacité et la capacité d'absorption d'énergie du système à solution absorbante dépendent de la concentration de liquide absorbant choisie, qui elle-même dépend des températures d'entrée et de sortie, de stockage et de restitution. La capacité de stockage thermique peut atteindre jusqu'à 1000 kJ/kg de solution.

Charging operation of the particular considered system to the maximum concentration takes 200 hours with input energy being at 1000 kWh/ton of salt anhydrate.

The useful heat energy extracted from the concentrated solution depends strongly on the temperature and humidity of discharging air stream. The practical energy storage density of the absorbent solution under the chosen conditions is 800 kWh/ton of salt anhydrate.

The proposed system works very well within its limitations, i.e. the thermodynamical states of charging and discharging air streams. Dimensioning of the system should take into account an optimized heat charging and discharging rate in the function of temperature and humidity of air streams.

All considerations should lead to the design of seasonal heat storage for solar heating systems without a need of back-up heat energy for a house of a total heat demand of 12 MW annually.

L'opération de stockage de chaleur jusqu'à la concentration maximale pour le système analysé requiert 200 heures lorsque l'énergie est fournie à un taux de 1 000 kWh/tonne d'anhydrate de sel.

L'énergie calorifique utile extraite de la solution concentrée dépend en grande partie de la température et de l'humidité des jets d'air. La capacité de stockage pratique de la solution absorbante dans les conditions choisies est de 800 kWh/tonne d'anhydrate de sel.

Le système proposé fonctionne très bien à l'intérieur de ses limites, c'est-à-dire des états thermodynamiques de ses jets d'air de stockage et de restitution. Le dimensionnement du système devrait tenir compte des taux de stockage et de restitution de chaleur, qui dépendent de la température et de l'humidité des jets d'air.

Toutes ces constatations devraient permettre de concevoir un stockage thermique saisonnier pour une installation de chauffage solaire pouvant desservir une maison dont la consommation de chaleur est de 12 MW par année, sans qu'un chauffage d'appoint soit nécessaire.

MODEL OF A HEATING INSTALLATION CONSISTING OF SOLAR COLLECTORS, STORAGE TANK AND HEAT PUMP

MODÉLISATION D'UNE INSTALLATION DE CHAUFFAGE COMPORTANT CAPTEURS SOLAIRES, CUVE DE STOCKAGE ET THERMOPOMPE

M. Charlier et P. Wauters
Université Catholique de Louvain
Louvain-la-Neuve, Belgique

Research continues to develop in the field of residential heating. A heat pump to make use of the energy captured by solar collectors seems to be a solution that is relatively well adapted to the Belgian climate.

An experimental residential heating facility has been designed for this purpose and consists of:

- a collection surface comprising 63 m^2 of uncovered solar collectors;
- a low-temperature calorie storage provided by a tank containing 7 m^3 of glycol solution;
- a glycol solution-to-air heat pump extracting low-temperature energy from the tank and transferring it at higher temperature to the heating air.

Programs in 1983 and 1984 were conducted to systematically measure the following parameters: temperature, flow, pressure and electrical consumption. A theoretical study of the behaviour of each component considered separately (solar panels, storage tank and heat pump) was done for the purpose of developing a theoretical operational model of this system and preparing related simulation software.

This model showed the predominant influence of the heat storage in the installation. A more thorough study of this storage was then conducted. This involved examination of the phenomenon of mixing of the various glycol solution layers in the tank and consideration of other more suitable storage methods (water-ice mixture). We conclude by establishing energy and economic balances for situations in which the following parameters vary: storage capacity, conduction coefficient of the walls, coefficient of

À l'heure actuelle, les recherches dans le domaine du chauffage domestique de bâtiments se développent de plus en plus. La valorisation au moyen d'une thermopompe de l'énergie recueillie par des capteurs solaires semble être une solution relativement bien adaptée au climat belge.

Une installation expérimentale de chauffage domestique a été conçue dans cet esprit et comprend:

- une surface réceptrice constituée de 63m^2 de capteurs solaires nus;
- un stockage calorifique à basse température, assuré par une cuve de 7m^3 d'eau glycolée;
- une pompe à chaleur eau glycolée - air puisant de l'énergie à basse température dans la cuve pour la réinjecter à température plus élevée dans l'air de chauffage.

Des campagnes de mesure systématique des paramètres suivants: température, débit, pression et consommation électrique, ont été effectuées en 1983 et 1984. L'étude théorique du comportement de chaque composant pris séparément (panneaux solaires, cuve de stockage et pompe à chaleur), a été faite en vue de l'élaboration d'un modèle théorique de fonctionnement de ce système et d'un logiciel de simulation s'y rapportant.

Ce modèle a montré l'influence prépondérante du stockage calorifique dans l'installation. Une étude plus approfondie de ce dernier a été ensuite effectuée. C'est ainsi qu'on a examiné le phénomène du mélange des diverses couches d'eau glycolée dans la cuve et considéré d'autres modes de stockage plus intéressants (mélange eau - glace). Nous établissons en guise de conclusion des bilans énergétiques et économiques pour des situations dans lesquelles les paramètres suivants varient: capacité de stockage,

stratification and percentage of ice in the glycol solution tank.

coefficient de conduction des parois, coefficient de stratification et pourcentage de glace dans la cuve d'eau glycolée.

A SOLAR HEATING PLANT WITH HEAT PUMP AND SEASONAL STORAGE - SYSTEM DESIGN INFLUENCE ON THERMAL PERFORMANCE AND ECONOMY

CENTRALE DE CHAUFFAGE SOLAIRE À STOCKAGE SAISONNIER MUNIE D'UNE POMPE À CHALEUR - INFLUENCE DU TYPE DE SYSTÈME SUR LA PERFORMANCE THERMIQUE ET ÉCONOMIQUE

Jan-Olof Dalenbäck
Chalmers University of Technology
Gothenburg, Sweden

Introduction

At the present, a Swedish solar heating plant with heat pumps and an underground water heat store has been in operation for five years. The Lambohov plant supplies space heating and domestic hot water for a residential area with 55 single-family houses. The plant has 2800 m^2 of flat plate collectors, mounted on the roofs of the houses and connected to a 10,000 m^3 water heat store. In order to increase the efficiency of the collectors and the capacity of the heat store, heat pumps are used. Solar coverage of the annual demand is about 70%.

The purpose of the work is to draw more general conclusions concerning the technical design and the economy for seasonal storage solar systems based on experiences from Lambohov.

Method of approach

The evaluation work involves the following main tasks, to study the impact on thermal performance of system design variations, and to perform a cost analysis and estimate future cost benefits.

In order to study the overall-system performance it is essential to have reliable simulation models. Measurement datas for the existing plant in operation have been utilized for validations of the simulations.

The solar thermal yield with and without heat pumps for the average year has been calculated providing a constant store volume and varying collector area for the following cases. Flat plate solar collectors having as-measured efficiency in combination with a 10,000 m^3 rock pit having up to standard or as-measured underground thermal insulation.

Introduction

Une centrale de chauffage solaire avec pompe à chaleur et stockage souterrain d'eau chaude fonctionne depuis 5 ans en Suède. La centrale de Lambohov fournit le chauffage et l'eau chaude d'une zone résidentielle comprenant 55 maisons unifamiliales. La centrale comprend 2 800 m^2 de capteurs solaires plans montés sur les toits des maisons et reliés à un réservoir d'eau chaude de 10 000 m^3. Des pompes à chaleur augmentent l'efficacité des capteurs et la capacité du réservoir de chaleur. 70 % des besoins annuels de chauffage proviennent du solaire.

Le but de ce travail est de tirer des conclusions générales concernant la conception et la rentabilité des installations avec un stockage saisonnier d'énergie solaire en se basant sur les expériences de Lambohov.

Méthodologie

Le travail d'évaluation comprend les tâches principales suivantes: étude de l'impact sur le rendement thermique de l'installation des diverses variantes de conception et analyse des coûts et de la rentabilité future.

Afin d'étudier le rendement global de l'installation, il est essentiel d'avoir des modèles de simulation fiables. Les mesures dans la centrale existante ont été utilisées pour la validation des modèles de simulation.

L'énergie thermique solaire obtenue avec ou sans pompe à chaleur pour l'année moyenne a été calculée pour un volume de stockage constant et avec des aires de capteurs variables. On a mesuré le rendement de capteurs solaires plans reliés à un réservoir de roches de 10 000 m^3, isolé thermiquement sur mesure ou de façon normale.

To perform cost analysis on different combinations a present value analysis has been applied.

Significant results

Thermal performance: 100% coverage with heat pumps, i.e. 70% solar coverage, corresponds to a minimum 2000 m^2 of collectors if only the top of the heat store is thermally well insulated. On the other hand a heat store completely well insulated corresponds to 1500 m^2 of collectors. In a system without heat pumps the solar coverage is about 65% if the heat store is well insulated.

Cost analysis: Low-cost ancillary piping and water-side equipment with a simple design must be used in solar heating plants with seasonal storage systems aimed to be competitive with fossil heat.

Pour effectuer une analyse des coûts avec différentes combinaisons il a fallu employer une analyse de la valeur actualisée.

Résultats importants

Rendement thermique: 100 % des besoins avec les pompes à chaleur, c'est-à-dire 70 % provenant du solaire, correspondant à une aire de capteurs d'au moins 2 000 m^2 si seul le dessus du réservoir thermique est bien isolé. Par contre, un réservoir thermique très bien isolé peut ne nécessiter que 1 500 m^2 de capteurs. Dans une installation sans pompe à chaleur, l'énergie solaire obtenue est d'environ 65 % si le réservoir est bien isolé.

Analyse des coûts: Il faut utiliser des tuyaux et des pompes bon marché et une conception relativement simple pour les centrales de chauffage solaire avec stockage saisonnier si on veut concurencer des installations comparables utilisant du combustible fossile.

ANALYSIS AND THEORETICAL DESIGN OF CSHPSS IN POLAND

ANALYSE ET CONCEPTION D'UNE CENTRALE DE CHAUFFAGE À L'ÉNERGIE SOLAIRE AVEC STOCKAGE SAISONNIER EN POLOGNE

Miroslaw Dytczak and Stefan Turlejski
Technical University of Warsaw
Warsaw, Poland

Calculations and theroretical system design of a central solar heating plant with seasonal storage (CSHPSS) in Poland have been carried out.

The mathematical models describing heat transfer between the different elements (store, district heating system, collector piping system and heating installations in houses) and the surroundings, take into consideration the dynamics of these elements using the theory of linear systems.

For each of these elements, response functions are theoretically estimated based on climatic parameters for a Test Reference Year (TRY), temperature of the working fluids, etc. The discrete functions describing heat transfer between the elements and the surroundings as a function of time are determined using the convolution theorem. This method of approach results in very fast and detailed simulation of CSHPSS performance over a long period of time.

The design problem (exemplified by an estate consisting of 200 single-family houses) is treated as a multi-level optimization task.

The objective function constructed for Polish economical conditions is minimized using the Davidon-Fletcher-Powell method. As a sub-task in the optimization process, dynamic programming is utilized for the two piping systems.

The theoretical results as well as results of numerical simulations will be presented.

On a effectué les calculs de base et la conception théorique d'une centrale de chauffage à l'énergie solaire avec stockage saisonnier en Pologne.

Les modèles mathématiques décrivant le transfert thermique entre les différents éléments (stockage, réseau de chauffage urbain, réseau de conduits et installations de chauffage dans les habitations) et le milieu environnant tiennent compte de la dynamique de ces éléments en fonction de la théorie des systèmes linéaires.

Pour chacun de ces éléments on a évalué théoriquement les fonctions de réponse en se basant sur des paramètres climatiques pour une année de référence, la température des fluides caloporteurs, etc. Pour les fonctions discrètes décrivant le transfert thermique entre les éléments et le milieu environnant en fonction du temps on a utilisé le théorème de composition. Cette méthode donne une simulation rapide et détaillée du rendement à long terme d'une centrale de chauffage à l'énergie solaire avec stockage saisonnier.

La conception (illustrée par un groupe de 200 maisons unifamiliales) fait l'objet d'une optimisation à niveaux multiples.

La fonction objective élaborée en fonction des conditions économiques polonaises est minimisée au moyen de la méthode Davidon-Fletcher-Powell. Dans le processus d'optimisation, on utilise la programmation dynamique pour les deux réseaux de conduits.

Les résultats théoriques et les résultats des simulations numériques seront exposés.

OPTIMIZATION OF A COMBINED HEAT PUMP/STORAGE SYSTEM WITH SOLAR OR CONVECTIVE HEAT COLLECTORS

OPTIMISATION D'UNE INSTALLATION MIXTE POMPE À CHALEUR/STOCKAGE AVEC CAPTEURS SOLAIRES OU CAPTEURS DE CHALEUR À CONVECTION

Per-Ake Franck and Thore Berntsson
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

A computer program simulating a whole heating system for space heating in large multifamily houses or small district heating systems is presented. The system consists of a heat collector, which either is an ambient-air natural convective collector or a solar collector, a heat store with vertical pipes in the ground, and an electrically driven heat pump.

The most important design parameters from both a technical and an economical point of view are the sizes of the collector, the storage, the heat pump, and the way the system is controlled. The influence of these parameters on the SPF and heat supply ratio has been obtained with computer simulations and is discussed. It is shown how this influence can be presented in a generalized way.

With the aid of the technical results an economical optimization is made both in the case of ambient air and solar collectors. The optimum is in both cases flat but sensitive to the combination of the system parts. A sensitivity analysis on the optimum is made to show the influence of investment and energy costs. Finally the systems are compared with a heat pump without storage also under different economical assumptions.

Un programme informatique a été mis au point pour simuler le fonctionnement d'une installation de chauffage desservant de grandes maisons multifamiliales ou de petits réseaux de chauffage urbain. L'installation comprend un capteur de chaleur du type à convection naturelle de l'air ambiant ou un capteur solaire, un stockage thermique avec tubes verticaux dans le sol et une pompe à chaleur électrique.

Les plus importants paramètres de calcul des points de vue technique et économique sont le dimensionnement du capteur, du stockage et de la pompe à chaleur et le mode de régulation de l'installation. La simulation par ordinateur a permis de déterminer l'influence de ces paramètres sur le facteur de performance saisonnier et le taux de production de chaleur. Cette question est abordée et il est démontré comment elle peut être présentée de façon générale.

Les résultats techniques permettent de réaliser une optimisation économique dans le cas des capteurs à convection et des capteurs solaires. Dans les deux cas, l'optimum atteint un plateau mais est sensible à la combinaison des composants de l'installation. Une analyse de sensibilité de l'optimum est effectuée pour démontrer l'influence des coûts d'investissement et des coûts énergétiques. Enfin, les installations sont comparées à une pompe à chaleur sans stockage, en tenant compte de diverses hypothèses économiques.

THE VAULRUZ PROJECT EXPERIMENTAL RESULTS

LE PROJET VAULRUZ - RÉSULTATS D'ESSAI

J.C. Hadorn, P. Chuard, D. Chuard
SORANE S.A.
Lausanne, Switzerland

The Vaulruz project has been described in great detail during the first workshop (2nd STES conference, Stockholm, June 1983).

It is basically a solar heating plant (550 m^2 of double glazed flat plate roof integrated solar collectors), a seasonal storage of heat (3,500 m^3 of earth, with plastic tubes and insulation), an electrically driven 44 kW heat pump, and an auxiliary oil burner.

The plant supplies energy for the space heating of a highway maintenance center (approx. 25,000 m^3) with a peak load of approximately 320 kW and an annual heat demand of approximately 400 MWh (1,440 GJ).

The plant has been in full operation since March 1983 and is continuously monitored within the frame work of the swiss IEA Task VII works.

The monitoring approach will be shortly described and the following experimental results, from March 1983 to December 1984 will be presented:

- solar collectors array performances;
- heat pump performances;
- earth storage and buried heat exchanger performances;
- energy balances in the system.

The first results show that the components in the system behave as expected.

Les détails du projet Vaulruz ont été exposés en détail au cours du premier atelier (2ieme conférence "STES", Stockholm, juin 1983).

Il s'agit principalement d'une centrale solaire (capteurs plans à double vitrage d'une superficie de 550 m^2), d'une installation de stockage saisonnier (3 500 m^3 de terre avec tubes de plastique et isolation), d'une pompe à chaleur électrique de 44 kW et d'un chauffage à mazout d'appoint.

La centrale sert au chauffage des locaux d'un centre d'entretien routier (environ 25 000 m^3), avec une demande de pointe d'environ 320 kW et une consommation annuelle en chauffage d'environ 400 MWh (1 440 GJ).

La centrale est exploitée depuis mars 1983 et fait l'objet d'un contrôle continu dans le cadre des travaux du Groupe de travail VII (de Suisse) de l'AIE.

La méthode de contrôle sera exposée brièvement et les résultats d'essai suivants effectués de mars 1983 à décembre 1984 seront présentés:

- rendement des batteries de capteurs solaires;
- rendement de la pompe à chaleur;
- rendement du stockage souterrain et de l'échangeur de chaleur souterrain;
- bilan énergétique de l'installation.

Les premiers résultats démontrent que le rendement des composants de l'installation est conforme aux prévisions.

THERMAL ENERGY STORAGE IN THE ENERGY ECOSYSTEM

STOCKAGE D'ÉNERGIE THERMIQUE DANS L'ÉCOSYSTÈME ÉNERGÉTIQUE

Walter Hausz
Eco-Energy Associates
Santa Barbara, U.S.A.

The two principal benefits of thermal storage for heating and cooling of buildings and other applications in the energy ecosystem are:

1. Savings in capital costs for generation, transmission and distribution of electric (and other) energy if the cost of peaking equipment is greater than the equipment (and other) costs of storage to meet peak demands, and:

2. Savings in the cost of fuel, if the flexibility gained in matching supply and demand permits using cheaper fuels (coal and nuclear) instead of oil and gas, or if the overall efficiency of energy conversion and use can be increased by this flexibility.

The first includes storage for load management to reduce utility demand charges. The second includes cogeneration, or Dual Energy Use Systems (DEUS, an EPRI acronym). Potentially, cogeneration can increase the energy efficiency of utilities from under 35% to over 70%, if demand and supply of the multiple energy forms can be matched by storage.

In 1971-72, a study project called ECO-ENERGY was sponsored by Southern California Edison, ORNL, and General Electric. The increasing constraints and problems of utilities, both in environment (Ecology) and costs (Economics) merited a very broad look at what directions the overall energy system might take. Novel forms of energy generation, transport, storage and use were evaluated to select promising technologies that should be developed. This project was the first to seriously suggest that Aquifer Thermal Energy Storage (ATES) was a promising technology for seasonal storage (STES).

Le stockage thermique destiné au chauffage et au refroidissement des bâtiments ainsi qu'à d'autres fins présente deux avantages principaux:

1. Économies sur les coûts d'investissement pour la production, la transmission et la distribution d'énergie électrique (et autre), si la demande de pointe exige un matériel plus coûteux que le stockage, et:

2. Économies de coûts de carburant, si la plus grande souplesse obtenue en ajustant l'offre et la demande permet d'utiliser de l'énergie moins coûteuse (charbon, nucléaire) que le pétrole et le gaz, ou si l'efficacité globale obtenue par cette conversion d'énergie peut elle aussi être améliorée par cette souplesse accrue.

Dans le premier cas, le stockage thermique est utilisé à des fins de gestion de la charge pour réduire les frais de consommation d'énergie. Dans le second cas, on utilise la cogénération qui peut augmenter le rendement énergétique des installations de moins de 35 % à plus de 70 %, si l'offre et la demande pour diverses sources énergétiques peuvent être satisfaites par le stockage.

En 1971-72, la Southern California Edison, l'ORNL, et la General Electric ont parrainé l'étude "ECO-ENERGY". Les problèmes et les contraintes plus sévères rencontrées par les producteurs d'énergie du point de vue de l'écologie et des coûts (financiers) ont été examinés pour déterminer l'orientation globale de la politique énergétique. Les nouvelles formes de production, de transport, de stockage et d'utilisation de l'énergie ont été évaluées en vue de déterminer les technologies à développer. Cette étude a permis d'établir pour la première fois que le stockage en aquifère constituait une technologie très prometteuse dans le domaine du stockage saisonnier.

Over the following twelve years, the author and colleagues in a series of projects produced reports expanding on these technologies, and encouraged their development. This paper is a resume and re-appraisal of the role of thermal storage in these technologies and the potential benefits of their implementation.

Projects directly related to ATES were supported by the Office of Water Research (DOI) in 1975-76, by Battelle PNL and ORNL in 1980, and by the University of Minnesota/BPNL in 1981. Daily/weekly thermal storage alternatives were compared in studies for NASA/DOE, and EPRI in 1978-79, and in workshops organized and reported for EPRI in 1982-83, specifically for building heating and cooling. A project for EPRI in 1979 considered alternative means of long distance energy transport such as High Temperature Water, steam, hot oil, and molten salt, for DEUS including storage.

Au cours des douze années qui ont suivi, l'équipe de recherche a publié de plus amples études sur ces technologies. Le présent document constitue un résumé et une réévaluation du rôle du stockage thermique parmi ces technologies et des avantages possibles de leur mise en oeuvre.

Des études directement reliées au stockage d'énergie en aquifère ont été effectuées par l'Office of Water Research (DOI) en 1975-76, par le Battelle PNL et l'ORNL en 1980 et par l'Université du Minnesota/BPNL en 1981. Les installations de stockage thermique quotidien/hebdomadaire ont fait l'objet d'études pour le compte de la NASA/DOE et l'EPRI en 1978-79, et dans le cadre d'ateliers organisés par l'EPRI en 1982-83, particulièrement dans le domaine du chauffage et du refroidissement des bâtiments. Une étude effectuée en 1979 pour le compte de l'EPRI a examiné diverses solutions pour le transport d'énergie sur de longues distances par exemple, l'eau à température élevée, la vapeur, l'huile chaude et les sels fondus pour la cogénération avec stockage.

LATENT HEAT STORAGE IN FINNED TUBES

STOCKAGE DE LA CHALEUR LATENTE DANS DES TUBES A AILETTES

K.A.R. Ismail, DEM-FEC-UNICAMP
Campinas, S.P., Brazil
C.L.F. Alves, CTA-ITA
S. José dos Campos, S.P., Brazil

In an attempt to increase the heat transfer rate and reduce the convective currents in P.C.M. storage tanks, externally finned circular tubes are being studied both theoretically and experimentally. The heat transfer process dominated by conduction is given by:

Pour augmenter le rendement du transfert de chaleur et réduire les courants de convection dans les réservoirs de stockage à changement de phase, on envisage d'employer des tubes à ailettes circulaires et de les étudier au point de vue théorique et expérimental. Le transfert de chaleur dominé par la conduction est donné par la formule suivante:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r k_i \frac{\partial T_i}{\partial r}\right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{K_i}{r} \frac{\partial T_i}{\partial \theta}\right)$$

where the symbol i is used to identify liquid (l), solid (s) or fin (a).

où i est utilisé pour identifier le liquide (l), le solide (s) ou les ailettes (a).

The heat balance at the solid-liquid interface is:

L'équilibre thermique à l'interface solide-liquide est donné par la formule suivante:

$$\left(K_s \frac{\partial T_s}{\partial r} - K_l \frac{\partial T_l}{\partial r}\right) \left[1 + \frac{1}{r_s^2} \left(\frac{\partial r_s}{\partial \theta}\right)^2\right] = \rho_s L \frac{dr_s}{dt}$$

where r_s is the radial position of the interface. The analytical formulation of the problem is done by applying control volume techniques to the enthalpy formulation defined by:

avec r_s position radiale de l'interface. La formulation analytique du problème est effectuée en appliquant les techniques de contrôle du volume à la formule de l'enthalpie définie par:

$$H(t) = \int_T C(T)\, dT + \lambda \eta\, (T - T_m)$$

$$\eta(u) = \begin{cases} 1 & u \geq 0 \\ 0 & u < 0 \end{cases}$$

considering a step change of value λ when $T = T_m$ with λ as the latent heat of fusion per unit volume.

en considérant un changement d'état de valeur λ lorsque $T = T_m$, λ étant la chaleur latente de fusion par volume unitaire.

In terms of the new variables the heat transfer equation becomes:

Avec les nouvelles variables de transfert de chaleur l'équation devient:

$$C(\phi) \frac{\partial \phi}{\partial \tau} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R}\left(R K(\phi) \pi \frac{\partial \phi}{\partial R}\right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{K(\phi)}{R} \frac{\partial \phi}{\partial \theta}\right)$$

with the boundary conditions:

$\phi = 1$ when $R = 1$

$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 0$ when $R = \frac{r_m}{r_i}$

$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 0$ when $\theta = 0$

$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0$ when $\theta = \theta_m$

where

$$\phi = \frac{T_m - T}{T_m - T_w}$$

$$R = \frac{r}{r_i}$$

$$\tau = \frac{K_s}{r_i C_s} t$$

The initial condition can be specified conveniently according to the case.

The equation obtained is applicable to the phase change material in both the solid and liquid phases as well as to the metalic fin. Numerical calculations are done using the ADI approach. The parameters analysed include number of fins, fin length, fin width, compactness ratio and finally the difference between the phase change temperature and the wall temperature. An experimental rig was designed and instrumented in order to compare with the numerical results and verify the validity of the model proposed. Good agreement is found between the experimental and the numerical results. The findings of the present study are of great value in analysing and predicting the performance of phase change thermal storage devices.

avec les conditions limites suivantes:

$\phi = 1$ quand $R = 1$

$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 0$ quand $R = \frac{r_m}{r_i}$

$\frac{\partial \phi}{\partial R} = 0$ quand $\theta = 0$

$\frac{\partial \phi}{\partial \theta} = 0$ quand $\theta = \theta_m$

avec

$$\phi = \frac{T_m - T}{T_m - T_w}$$

$$R = \frac{r}{r_i}$$

$$\tau = \frac{K_s}{r_i C_s} t$$

Les conditions initiales peuvent être prévues facilement selon le cas.

L'équation obtenue s'applique au changement de phase des matériaux entre phase solide et liquide ainsi qu'aux ailettes métalliques. Les calculs numériques sont effectués en utilisant la méthode ADI. Les paramètres étudiés sont: le nombre, la longueur, la largeur et l'encombrement des ailettes ainsi que la différence entre la température de changement de phase et la température de la paroi. Un montage expérimental a été conçu et équipé d'instruments de mesure de façon à comparer les résultats numériques et à vérifier la validité du modèle proposé. On a trouvé une bonne corrélation entre les résultats expérimentaux et théoriques. Les résultats de cette étude sont donc d'une grande valeur pour étudier et prévoir le rendement des stockages thermiques faisant intervenir les changements de phase.

COMPARISON OF CONCEPTS FOR CENTRAL SOLAR HEATING PLANTS WITH SEASONAL STORAGE

ÉTUDE COMPARATIVE DE DIFFÉRENTES CONCEPTIONS DE CENTRALES DE CHAUFFAGE À L'ÉNERGIE SOLAIRE AVEC STOCKAGE SAISONNIER

D. Krischel
Interatom GmbH
Bergisch-Gladbach, F.R.G.

The technical feasibility and cost-effectiveness of large-scale, seasonal storage solar energy systems are examined within the work of task VII of the International Energy Agency's programme on solar heating and cooling. Based on design data collected by 10 participating countries the most promising system configuration was to find out of a variety of collector and storage types for given load and weather conditions.

We report on results of simulations with the MINSUN computer-code with a daily timestep which provides a more or less fixed system configuration and control strategy for different types of water storage systems, e.g. tank, pit or cavern. The system must be adjusted to the respective weather and economic conditions. Using the well-known TRNSYS-code with special storage models, the MINSUN-results are validated and additional work is done on refining the systems control strategy. Systems with and without heat pump, with and without a direct collector-to-load connection for uncovered, flat plate or evacuated tube collectors were investigated.

TRNSYS-results exist for the system with (DIR) and without (NODIR) direct collector-to-load connection. As for all other configurations higher temperatures are found for the DIR-version. For no-heat pump systems this results in solar fractions up to 10 percent higher than for the NODIR version, whereas the direct connection is of minor importance for systems including a heat pump. The most remarkable difference between MINSUN and TRNSYS is a more pronounced temperature stratification from the MINSUN model. This is caused by variable temperature controlled

La faisabilité technique et le rapport efficacité-coût des installations solaires de grandes dimensions avec stockage saisonnier sont étudiés dans le cadre des travaux du groupe VII du programme sur le chauffage et le refroidissement solaire de l'Agence internationale de l'énergie. En fonction des données recueillies auprès des dix pays participants, il s'agissait de trouver la configuration optimale parmi divers types de capteurs et de stockages suivant des charges et conditions météorologiques données.

Nous présentons les résultats de simulations effectuées au moyen du modèle informatique MINSUN, qui utilise des données quotidiennes par tranches horaires et qui permet d'obtenir une configuration plus ou moins fixe et un mode de régulation pour divers types de stockages hydrauliques comme les réservoirs, les puits ou les cavités rocheuses. Les installations doivent pouvoir être ajustées aux conditions économiques et météorologiques applicables. Les résultats MINSUN sont validés au moyen du programme bien connu TRNSYS appliqué à divers modèles spéciaux de stockage et de plus amples recherches sont effectuées dans le but d'améliorer le mode de régulation des installations. On a étudié des installations avec ou sans pompe à chaleur ainsi que des installations avec ou sans stockage en aval des capteurs et comportant des capteurs sans vitrage, à verre plat ou à tubes sous vide.

Les résultats TRNSYS sont fournis pour l'installation avec (NODIR) ou sans (DIR) stockage en aval des capteurs. Comme pour les autres configurations, les températures les plus élevées ont été obtenues sans stockage en aval. Pour les installations sans pompe à chaleur, les fractions d'apport solaire sont supérieures de 10 pour cent par rapport aux installations avec stockage. Toutefois, l'absence de stockage a une très faible influence lorsqu'il y a une pompe à chaleur. Une stratification plus marquée des températures distingue le modèle MINSUN du

storage inlets and outlets on both the collector and load side, respectively.

The energy delivered directly from the collector field to the load is determined by the collector type and the field area. In summer the direct supply is restricted by the load (domestic hot water); in winter the evacuated tube collectors can contribute up to 13 percent of the load directly.

In general the MINSUN and TRNSYS results are in acceptable agreement. They are discussed in more detail with respect to temperature stratification, array effects and different control strategies.

These investigations are financed by the German Ministry for Research and Technology in a one year's programme.

modèle TRNSYS, et ceci à cause des orifices d'alimentation et de vidange du stockage dont la commande est à température variable sur les canalisations capteurs et charge respectivement.

L'énergie transmise directement des capteurs à la charge est d'ailleurs fonction du type de capteur et de la superficie de captage. En été, l'alimentation directe est limitée par la demande (eau chaude sanitaire) et en hiver, les capteurs à tubes sous vide peuvent fournir directement jusqu'à 13 pour cent de la demande.

Les résultats des modèles MINSUN et TRNSYS concordent généralement. Ils sont présentés de façon plus détaillée, particulièrement en ce qui a trait à la stratification des températures, aux effets des capteurs et aux divers modes de régulation.

Ces études sont financées par le Ministère allemand de la recherche et de la technologie dans le cadre d'un programme d'un an.

OPENSOL: SOFTWARE FOR THE OPTIMIZATION OF SIZING AND CONTROL OF COMPLEX HEATING SYSTEMS WITH LONG-TERM HEAT STORAGE

OPENSOL: LOGICIEL D'OPTIMISATION DU DIMENSIONNEMENT ET DE LA COMMANDE DES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE COMPLEXES COMPRENANT UN STOCKAGE DE CHALEUR À LONG TERME

Y. Lenoir et C. Sneed
École Nationale Supérieure des Mines de Paris
Fontainebleu, France

Introduction

OPENSOL compiles and makes accessible for immediate use a collection of studies on the control and sizing of complex heating systems conducted at CAI-ENSMP since 1978 with financing by CNRS and then by DETN-GDF.

The solution devised for consistent prompt optimization of the collection and distribution of resources for heating and production of domestic hot water has been the subject of original theoretical developments, the applicability of which extends substantially beyond that of the energy field (cf F Chaplais, CAI-ENSMP, "Averaging et Contrôle Optimal Déterministe", 6ème Conférence Internationale sur l'Analyse et l'Optimisation des Systèmes [6th international conference on systems analysis and optimization], INRIA, Nice, June 19-22, 1984, Springer Verlag).

Description

The OPENSOL program is structed as a sequence of calculation diagrams to which "work files" and "data files" are assigned during the interactive exchanges with the user that mark the progress of an operation.

OPENSOL consists essentially of three modules with the following functions:

- economic optimization of the sizing of all dimensions affecting the thermal performance of the building and its heating installation; the method chosen is that of the "steepest path", except for the power of the device consuming commercial energy, which is limited by a MINMAX algorithm;

Introduction

OPENSOL rassemble et rend accessible à une pratique immédiate un ensemble d'études sur la commande et le dimensionnement des systèmes de chauffage complexes menées au CAI-ENSMP depuis 1978 avec le financement du CNRS, puis de la DETN-GDF.

La solution imaginée pour rendre cohérente l'optimisation instantanée du captage et de la répartition des ressources pour le chauffage et la production d'ECS (eau chaude sanitaire) a fait l'objet de développements théoriques originaux dont le champ d'application déborde largement celui de l'Énergétique (cf. F. Chaplais, CAI-ENSMP, "Averaging et Contrôle Optimal Déterministe", 6ème Conférence Internationale sur l'Analyse et l'Optimisation des Systèmes, INRIA, à Nice les 19-22 juin 1984, Springer Verlag).

Description

Le programme OPENSOL est structuré comme une séquence de schémas de calcul auxquels on affecte des "fichiers de travail" et des "fichiers de données" au cours des échanges interactifs avec l'utilisateur, lesquels jalonnent le déroulement d'une exploitation.

OPENSOL est pour l'essentiel composé de trois modules dont les fonctions sont les suivantes:

- optimisation économique du dimensionnement de l'ensemble des grandeurs influant sur la performance thermique du bâtiment et de son installation de chauffage. La méthode retenue est celle du "chemin de plus grande pente", sauf pour la puissance du dispositif consommant de l'énergie commerciale qui est délimitée par un algorithme de MINMAX.

- optimization of the annual management of the solar (or climatic) energy collection and storage complex, subject to limitation by a maximum available power value; the annual command function takes the form of a sequence of high-level variables (actualized marginal prices for stored energy, threshold and specified temperatures for distribution of collected energy between main storage and domestic hot water) and a maximum commercial power value, which serve to "inform" the optimum short-term and immediate commands;

- simulation using commands developed with more cumbersome simulation models than those that can be used for optimizations.

- optimisation de la gestion annuelle du complexe de captage et de stockage de l'énergie solaire (ou climatique) sous la contrainte d'une puissance disponible maximum. La loi de commande annuelle prend la forme d'une séquence de variables de haut niveau (prix marginaux actualisés de l'énergie stockée, températures de seuil et de consigne pour la répartition du captage entre les stocks principaux et d'ECS) et d'une puissance commerciale maximale, qui servent à "informer" les commandes optimales à court terme et instantanées.

- simulation qui met en oeuvre les commandes élaborées avec des modèles de simulation plus lourds que ceux auxquels on peut faire appel lors des optimisations.

Capacity

Relying on powerful, adapted methods of optimum command, OPENSOL is a vigorous program with a capacity to increase expansion of its library of work and data files.

In its current development stage, it allows processing of sizing and command optimizations for more than 2,000 different configurations of bi-energy heating systems that include a long-term heating storage and complementary storage facilities for domestic hot water and for regularizing demand for commercial forms of energy. It can be used to calculate sub-optimum commands by switching to extreme strategies.

OPENSOL is written in FORTRAN 77 and stored under UNIX.

Capacité

S'appuyant sur des méthodes de commande optimale puissantes et adaptées, OPENSOL est un programme robuste dont la capacité croîtra au fur et à mesure de l'extension de sa bibliothèque de fichiers de travail et de données.

Dans son développement actuel il permet de traiter les optimisations de dimensionnement et de commande de plus de 2 000 configurations différentes de systèmes de chauffage bi-énergie comprenant un stock de chaleur à long terme et des stocks complémentaires pour l'ECS et pour régulariser l'appel à l'énergie commerciale. On peut l'utiliser pour calculer des commandes sous-optimales par commutations de stratégies extrêmes.

OPENSOL est écrit en FORTRAN 77 et implanté sous UNIX.

STORAGE OF OFF-PEAK ELECTRICAL ENERGY IN BUILDING FLOORS WITH PARTICULAR REFERENCE TO RESISTANCE HEATING AND HEAT PUMP SYSTEMS

STOCKAGE D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE HORS POINTE DANS LES PLANCHERS EN PARTICULIER DANS LE CAS DE CHAUFFAGE PAR RÉSISTANCES OU PAR POMPE À CHALEUR

P.F. Monaghan and G.N. O'Donnell
University College
Galway, Ireland

In the selection of a heating system on the basis of life cycle costs, the main considerations are annual energy costs, capital cost and maintenance cost. The trend towards lower energy buildings improves the cost-effectiveness of systems which have low capital and maintenance costs. An off-peak electrical resistance floor heating system which uses metals or conductive plastics as heating elements offers the possibility of low capital and maintenance costs. Alternatively, water-cooled heat pumps which supply energy to floor heating systems only at off-peak times could offer extremely low annual energy costs.

This paper describes the design and energy performance of such systems. Particular emphasis is placed on transient behaviour of the floor, transient behaviour of the house and variation of environmental comfort with time. Attention is focused on the residential market. A comparison is made between these two floor heating systems and three more conventional heating systems.

The University of Strathclyde E.S.P. package was used to compare annual energy performance of the systems in representative housing designs. A transient Heat Transfer analysis was carried out on the underfloor heating systems. This utilised the finite difference approach and heat input to the floor was restricted to off-peak hours. Two major features were of concern in the preliminary design: (i) The quantity of heat leaving the floor surface with acceptable floor surface temperatures; (ii) The amount of heat that is delivered by the floor in what was termed "the demand period", i.e. the period during

Dans le choix d'une installation de chauffage en fonction des coûts sur la durée de vie utile, les principales considérations sont les coûts annuels en énergie, le coût d'investissement et les frais d'entretien. La tendance à construire des bâtiments à meilleur rendement énergétique améliore la rentabilité des installations qui ont des coûts d'investissement et d'entretien modérés. C'est ce qu'offre une installation de chauffage par résistances électriques dans le plancher utilisant l'électricité en dehors des heures de pointe au moyen de métaux et de plastiques conducteurs comme éléments de chauffage. Une autre solution est offerte par des pompes à chaleur refroidies par eau et fournissant de l'énergie à une installation de chauffage par le plancher seulement en-dehors des heures de pointe, qui pourraient avoir des coûts annuels en énergie très réduits.

Le présent document décrit la conception et le rendement énergétique de ce type d'installations. Il étudie particulièrement le comportement transitoire du plancher et de la maison et les variations des conditions de confort en fonction du temps. Il met surtout l'accent sur le marché résidentiel. On trouve également une comparaison entre ces deux installations de chauffage par le plancher et trois installations plus traditionnelles.

Le programme E.S.P. de l'Université de Strathclyde a été utilisé pour comparer les rendements énergétiques annuels de ces deux systèmes dans certains types de maisons représentatives. Une analyse de la transmission de chaleur transitoire a été effectuée sur les installations de chauffage sous le plancher. L'approche utilisée était celle des différences finies; de la chaleur n'était fournie au plancher qu'en dehors des pointes. Les deux caractéristiques principales suivantes devaient être prises en compte dans la conception de l'avant-projet: i) la quantité de chaleur émanant de la

which the highest standards of environmental comfort are required.

surface du plancher sans que sa température soit excessive; ii) la quantité de chaleur fournie par le plancher au cours de ce qu'on a appelé la "période de demande", c'est-à-dire la période pendant laquelle les meilleures conditions de confort sont exigées.

It was found that the most important parameters controlling the features were: (i) Heat input rate; (ii) Timing of heat input; (iii) Thickness and type of concrete; (iv) Type of floor covering; (v) Levels of floor insulation.

On a découvert que les principaux paramètres qui influent sur ces caractéristiques sont les suivants: i) le flux thermique; ii) les périodes de chauffage; iii) l'épaisseur et le type de béton; iv) le type de revêtement de sol; et v) la valeur d'isolation du plancher.

The major results are: (i) Both floor heating systems can provide adequate heat input to give recognised comfort levels in low energy buildings; (ii) The five parameters listed above can be manipulated to give different heat release cycles.

Les principales conclusions sont les suivantes: i) les deux installations de chauffage par le plancher peuvent fournir une quantité de chaleur adéquate pour maintenir de bonnes conditions de confort dans les bâtiments à faible consommation d'énergie; et ii) les cinq paramètres mentionnés précédemment peuvent être modifiés pour obtenir des cycles de production de chaleur différentes.

In conclusion, the two off-peak electrical systems studied provide viable alternatives to conventional heating systems for low energy buildings.

En conclusion, les deux systèmes de chauffage utilisant l'électricité hors pointe qui ont été analysés constituent des alternatives viables aux installations de chauffage traditionnelles dans les bâtiments à faible consommation d'énergie.

THE BOREHOLE HEAT STORE AT LULEÄ, SWEDEN

LE STOCKAGE DANS UN FORAGE À LULEÄ (SUÈDE)

Bo Nordell
Luleä University of Technology
Luleä, Sweden

In 1982/83 the first large-scale borehole heat store was constructed at Luleä University of Technology, Sweden. The main part of the seasonal heat storage system is a rock volume of 100,000 m^3. The store is utilized for heating of one of the university buildings, with a heat demand of 2 GWh. This demand corresponds to the need of 100 one-family-houses in northern Sweden. The store is connected to the district heating system. The heat is produced by surplus gas from the local steel plant. During May to October the store is heated to 65°C. During November to April the store is discharged, and the temperature is lowered to about 30°C. The store has been in operation since July, 1983.

The following subjects are dealt with in the paper:

- design and construction;
- research program;
- thermal functioning;
- costs.

Le premier grand forage pour le stockage thermique a été construit en 1982-1983 à l'Université de technologie de Luleä (Suède). La principale composante de cette installation de stockage saisonnier est un réservoir foré dans le roc dont la capacité est de 100 000 m^3. Ce stockage sert à chauffer un des bâtiments de l'université, dont la consommation de chaleur est de 2 GWh. Cette consommation est équivalente à celle de 100 maisons unifamiliales dans le nord de la Suède. Le stockage est relié au système de chauffage urbain. La chaleur est produite à partir des gaz résiduels d'une acierie voisine. De mai à octobre, le stockage est chauffé jusqu'à 65 °C. De novembre à avril, la chaleur est utilisée et la température de stockage redescend à environ 30 °C. Ce forage est en exploitation depuis juillet 1983.

Le document traite des sujets suivants:

- conception et construction;
- programme de recherche;
- fonctionnement thermique;
- coûts.

A HVAC SYSTEM BASED ON SEASONAL HEAT STORAGE

INSTALLATION DE CHAUFFAGE, VENTILATION ET CONDITIONNEMENT D'AIR AVEC STOCKAGE THERMIQUE SAISONNIER

Börje Ostensson
SCANDENERGY AB
Nyköping, Sweden

In October 1984, a new HVAC system was put into operation at Viberga supermarket in Finspong, Sweden.

The system includes a heat storage where waste heat from freezers and from air conditioning is stored during summer.

The storage is of the SUNSTORE® type and consists of rock surrounding 24 drilled holes each of which is 110 m (3300 feet) deep. The rock is heated to approximately 25°C.

In winter, the supermarket is heated with stored heat via a heat pump. Together with waste heat from freezers this heat covers 90% of the total heat demand of 1200 MWh. The last 10% is covered by a peak load oil burner.

The system was built by SCANDENERGY on a purely commercial basis, with a pay off time for the investment (2.3 MSEK) of five years.

This paper presents system design and experiences from construction and operation.

En octobre 1984, une nouvelle installation de chauffage, ventilation et conditionnement d'air a été mise en service au supermarché Viberga à Finspong en Suède.

L'installation comporte un stockage thermique où l'on accumule pendant l'été la chaleur récupérée provenant des congélateurs et appareils de climatisation.

Le stockage est du type "SUNSTORE" (MD) et se compose de 24 forages dans le roc de 110 m (330 pieds) de profondeur chacun. Le roc est chauffé à environ 25 °C.

En hiver, les locaux sont chauffés par une pompe à chaleur utilisant l'énergie stockée qui, combinée avec la chaleur dégagée par les congélateurs répond à 90 % de la demande totale en chauffage (1 200 MWh). Un brûleur à mazout fonctionnant pendant les pointes satisfait au reste de la demande.

L'installation a été construite par le Groupe SCANDENERGY sur une base purement commerciale, l'amortissement financier s'échelonnant sur cinq ans (investissement de 2.3 MSEK).

La présente communication porte sur les caractéristiques de conception, la construction et l'exploitation de l'installation.

ENERGY STORAGE BY ADSORPTION OF WATER ON ZEOLITE FOR BUILDING HEATING

STOCKAGE D'ÉNERGIE PAR ADSORPTION D'EAU DANS LA ZÉOLITE POUR LE CHAUFFAGE DES BÂTIMENTS

G. Restuccia, G. Cacciola, V. Recupero and R. Di Leonardo
CNR Institute for Transformation and Storage of Energy
Messina, Italy

Among the gas-solid adsorption processes, the zeolite-water pair seems to be very interesting to realize heat storage for domestic or industrial heating and cooling.

The fundamentals of operation and the thermodynamic parameters of the process are well known, but the technical and economical development of these systems depends upon the solution of several technical aspects, the most important of which are heat and mass transfer. In fact, as zeolites are solids with very low thermal conductivity, heat transfer toward thermal source and load is the limiting factor for high specific power and economic feasibility of the system. Besides, the zeolite-water adsorption heat storage is a closed-loop cycle where the mass transfer depends upon the differential vapour pressure between the water and the zeolite located in their containers, so that little pressure drops due to the zeolite packed bed or to the plant configuration, reduce the mass transfer.

Altogether the solution of the heat and mass transfer problems require an accurate design of the plant components.

Particularly, according to other authors, the project of a plant must take into account the following theory developed for any gas-solid adsorption process: in the zeolite tank, the adsorbed/desorbed water vapour is the thermal carrier if both the thermal and mass flows go in the same direction. Under these conditions the thermal conductivity of the bed depends only on the thermal conductivity of the gas which is obviously higher than that of the solid.

Parmi les méthodes d'adsorption gaz-solide, l'utilisation de zéolites et d'eau semble très intéressante pour stocker la chaleur dans les systèmes de chauffage et de refroidissement domestiques ou industriels.

Les principes fondamentaux du fonctionnement et les paramètres thermodynamiques de la technique sont bien connus, mais la mise au point économique et technique des installations dépend de la solution de plusieurs problèmes techniques (le plus important étant les transferts de chaleur et de masse). En fait, comme les zéolites sont des solides qui n'ont qu'une très faible conductivité thermique, le transfert de chaleur vers la source chaude et l'utilisation sont les facteurs qui limitent la faisabilité économique et la puissance spécifique de l'installation. De plus, le stockage de chaleur par adsorption au moyen d'un système zéolite-eau est un cycle fermé où le transfert de masse dépend de la pression de vapeur différentielle entre l'eau et la zéolite dans le contenant, de sorte qu'il y a un faible relâchement de pression dû au lit de zéolite ou à la configuration de la centrale, ce qui réduit le transfert de masse.

La solution aux problèmes de transfert de masse et de chaleur nécessite une grande précision dans la conception des éléments de la centrale.

Selon d'autres auteurs, le projet d'une centrale doit tenir compte de la théorie suivante sur la méthode d'adsorption gaz-solide: dans le réservoir de zéolite, la vapeur d'eau adsorbée ou rejetée est le caloporteur si les flux thermiques et les masses vont dans la même direction. Dans ces conditions, la conductivité thermique du lit de roches dépend seulement de la conductivité thermique du gaz qui est évidemment plus élevée que celle du solide.

Our work is directed to the realization of a small scale plant which satisfies the above mentioned theory. A special design of the shell and finned-tube heat exchanger located in the zeolite bed allows the desired parallelism of the heat and mass flows.

In the same plant a good mass transfer is obtained by a compact geometry of the evaporator-adsorber subsystem.

This paper describes the design methodology of the whole plant, pointing out to the heat exchanger project, the plant assembling and experimental results.

Nos travaux portent sur la réalisation d'une centrale miniature qui fonctionne selon cette théorie. Une conception spéciale de l'enveloppe et de l'échangeur de chaleur à calandre placé dans le lit de zéolites permet d'obtenir le parallélisme souhaité des flux de chaleur et de masse.

Dans la même centrale un transfert de masse est obtenu au moyen d'une sous-installation évaporateur-adsorbeur de forme géométrique assez compacte.

Ce document décrit la méthode de conception de la centrale, en insistant plus particulièrement sur le projet d'échangeur de chaleur, l'assemblage de la centrale et les résultats expérimentaux.

PRESENTATION OF A SOFTWARE PACKAGE FOR AUTOMATED EVALUATION OF SOIL HEAT STORAGE PROJECTS

PRÉSENTATION D'UN LOGICIEL POUR L'ÉVALUATION AUTOMATISÉE DES PROJETS DE STOCKAGE DE CHALEUR DANS LE SOL

J.P. Sauty et J.Y. Ausseur
B.R.G.M., Bureau de Recherches Géologiques et Minières
Orléans, France

The Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France) has been working for almost ten years in the field of soil heat storage by injection of hot water into an aquifer or by circulation of water in a closed loop in buried heat exchangers.

This work includes general studies using models, experiments at various scales on location and evaluation of about a hundred projects involving underground thermal properties.

With the benefit of this experience, the authors have compiled the various simplified formulas and charts in a publication soon to be completed. It primarily concerns the thermal behaviour of the subsoil and evaluation of usable amounts of heat, although it also deals with surface requirements and the estimating of investment and operating costs.

However, the use of these documents is not always easy for a planner, who is often not experienced in mathematical functions and nondimensional numbers. Therefore, a computerized version of this manual is being prepared in 1985, at the request of Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie. This software package, installed in a microcomputer, is used in conversational mode: the various climatic, thermal, hydraulic and financial parameters are requested of the user and default values are proposed. A description of the problems and decisions to be taken are clearly displayed on the screen at the appropriate moment.

In output, the software displays the recovery rate of stored calories, the changes in energy levels and the thermal impact on the subsoil; coverage of surface requirements and evaluation of investments and operating costs appear opposite the quantities of energy conserved and transferred. Finally, this software package processes not only heat

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (France) travaille depuis près de 10 ans dans le domaine du stockage de chaleur dans le sol: par injection d'eau chaude en aquifère, ou par circulation d'eau en boucle fermée dans des échangeurs enterrés.

Ces travaux comprennent des études générales sur modèle, des expérimentations à échelles diverses sur le terrain et l'évaluation d'une centaine de projets d'exploitation thermique du sous-sol.

Mettant à profit cette expérience, les auteurs ont rassemblé les différentes formules simplifiées et abaques dans un ouvrage en cours d'achèvement. Celui-ci concerne au premier chef le comportement thermique du sous-sol et l'évaluation des quantités de chaleur exploitables, mais aussi les besoins de surface, l'estimation des frais d'investissement et de fonctionnement.

Cependant, l'utilisation de ces documents n'est pas toujours aisée pour un projecteur qui souvent n'a pas la pratique des fonctions mathématiques et des nombres adimensionnels. C'est pourquoi une version informatisée de ce manuel est en cours de réalisation en 1985, à la demande de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Énergie. Ce logiciel implanté sur micro-ordinateur est exploité en mode conversationnel: les différents paramètres climatiques, thermiques, hydrauliques, financiers sont demandés à l'utilisateur; des valeurs par défaut lui sont proposées. La description des difficultés et des décisions à prendre apparaît clairement à l'écran, le moment venu.

En sortie, le logiciel affiche le taux de récupération des calories stockées, l'évolution des niveaux énergétiques et l'impact thermique sur le sous-sol; la couverture des besoins de surface ainsi que l'évaluation des investissements et des frais de fonctionnement apparaissent en regard des énergies économisées et déplacées. Enfin, ce

storage, but also direct use without thermal replenishment (heat pumps using ground water or soil-to-water heat pumps).

logiciel traite non seulement le stockage de chaleur, mais aussi l'exploitation directe sans recharge thermique (pompes à chaleur sur nappe, pompes à chaleur sol-eau).

SIMULATION AND EXPERIMENTS IN MODERATE CLIMATE CONDITIONS ON THE BEHAVIOUR OF GREENHOUSES, FITTED OUT WITH A SHORT-TERM ROCK-BED THERMAL STORAGE

SIMULATION ET EXPÉRIENCES EN CLIMAT TEMPÉRÉ DU RENDEMENT DE SERRES DOTÉS D'UN STOCKAGE THERMIQUE À COURT TERME PAR LIT DE GALETS

J. Van Loey, R. Van de Perre, E. Leskens
Free University of Brussels
Brussels, Belgium

A solar retrofit for existing greenhouses is presented. The solar system, developed for horticulture applications in a moderate climate, is also appropriate for the housing sector, new built greenhouses and other climate zones. A full year measurement campaign (1983) indicated an energy saving on an annual basis of 70%, for the culture of grapes and vegetables in Belgium. The solar system consists of a self-made flat plate air-collector (in the ridge of the greenhouse) connected to a pebble-bed (placed in the soil) through a regulation and air-distribution system (including flow inversion in the storage).

The materials used are extremely simple and cheap. Constructing the system is very low-work intensive too. The whole investment (without labour-cost) for the retrofit of one greenhouse (20 x 8 m^2) mounted up (in 1983) to US$ 800. Installation of the system was done by three men during nine days.

A numerical model for the system has been recently developed and a software package for simulation and optimisation of the system is still under study. Good simulation results (compared to experiments) have been obtained for the thermal behaviour of the storage (heat-exchanger) and the empty greenhouse (dynamic simulations). At this moment the system-regulation is under study, together with the option of one centralized storage in connection to several greenhouses.

The latest results of our research will be presented at ENERSTOCK 85.

Le présent article décrit un système solaire pour serres existantes. Mis au point pour l'horticulture en climat tempéré, ce système est également approprié pour le secteur résidentiel, les nouvelles serres, et même d'autres zones climatiques. Des mesures effectuées pendant toute une année (1983) ont indiqué des économies annuelles d'énergie de 70 %, dans le cas de la culture de raisins et de légumes en Belgique. Le système solaire comprend un capteur plan à air fait spécialement (près du faîte de la serre) relié à un lit de galets (dans le sol) par un système de régulation et de distribution de l'air (avec inversion du flux dans le stockage).

Les matériaux nécessaires sont très simples et peu coûteux. La construction demande également très peu de main d'oeuvre. L'investissement total (moins la main-d'oeuvre) pour équiper une serre de 20 x 8 m^2 déjà en place, s'est élevé à 800 $ U.S. (en 1983). Les travaux ont occupé trois hommes pendant neuf jours.

Un modèle numérique du système a été récemment mis au point et un progiciel de simulation et d'optimisation est encore à l'étude. La simulation du comportement thermique du stockage (échangeur de chaleur) et de la serre vide (simulations dynamiques) ont déjà donné de bons résultats (comparés aux résultats expérimentaux). À l'heure actuelle on étudie la régulation ainsi que la possibilité d'un stockage central commun à plusieurs serres.

Les plus récents résultats de nos recherches seront présentés à ENERSTOCK 85.

OPTIMAL MANAGEMENT OF HEAT STORAGE FOR A HEATING AND COOLING PLANT: EQUATIONS AND EXAMPLE OF SOLUTION

GESTION OPTIMALE DE STOCKS DE CHALEUR COUPLES À UNE CENTRALE DE CHAUFFAGE ET CLIMATISATION: MISE EN ÉQUATION ET EXEMPLE DE SOLUTION

Pierre H. Vasselin
Équipe R.A.M.S.E.S.
Orsay, France

The purpose of this study, begun in November 1980, was to demonstrate the economic advantages of warm and/or cold water thermal storage reservoirs allowing the recovery of heat removed during air conditioning and regularization of electrical demand in large office buildings. It became apparent that a heating period of about a week was appropriate for the study, and that the hypothesis of stratification of reservoirs was the most desirable.

For this purpose, we wrote a simplified program for calculating hourly thermal loads, based on DOE2 for thermal inertia problems of a building and on TRNSYS for solar gain (any other program generating an overall hourly thermal load - a single thermal zone - may be used). To meet this demand, all combinations of the various modes indicated in the appendix are considered. The variations in the COP of the thermal machine, and in the cost of distributing electrical energy, result in complex optimization calculations stemming from methods of dynamic programming.

By developing the WAPITI simulation model, we were able to calculate, for a given building under known weather conditions, the optimum path for the storage, and to deduce from this both the ideal dimensions for the reservoirs and the savings to be expected (in fact, we obtained the expression of an understatement and an overstatement of the theoretical minimum sought). The economic calculation which can be obtained from this suggests a return of investment period of about four to eight years, under optimum conditions, in Montreal.

However, the designer is faced with the problem of effectively operating along an optimum path for conditions which are partly unknown in advance. He requires a command function enabling him to guide the facility

Le but de cette étude, amorcée en novembre 80, était de démontrer l'intérêt économique des réservoirs de stockage thermique à l'eau, chaud et/ou froid, permettant la récupération de la chaleur évacuée lors de la climatisation et la régularisation de la demande électrique dans les grands édifices à bureaux. Il est apparu qu'il convenait d'étudier une période de chauffage de l'ordre de la semaine, et que l'hypothèse de stratification des réservoirs était la plus souhaitable.

Nous avons pour cela écrit un programme simplifié de calcul des charges thermique horaire, inspiré de DOE2 pour les questions d'inertie thermique du bâtiment, et de TRNSYS pour le gain solaire (tout autre programme générant une charge thermique horaire globale - une seule zone thermique - peut être utilisé). Pour répondre à cette demande, toutes les combinaisons des différents modes figurés en annexe sont envisagées. Les variations du COP de la machine thermique, et du côut de distribution de l'énergie électrique conduisent à des calculs d'optimisation complexes, relevant des méthodes de la programmation dynamique.

Développant le modèle de simulation WAPITI, nous avons pu calculer, pour un bâtiment donné et dans des conditions météorologiques connues, la trajectoire optimale des stocks, et en déduire d'une part la dimension idéale des réservoirs, d'autre part l'économie escomptable (on abouti en fait à l'expression d'un minorant et d'un majorant du minimum théorique cherché). Le calcul économique qui peut alors s'ensuivre permet d'envisager un temps de retour de l'investissement de l'ordre de 4 à 8 ans, dans les meilleurs cas, à Montréal.

Mais pour le concepteur se pose la question d'opérer effectivement selon une trajectoire optimale pour des conditions en partie inconnues à l'avance. Il lui est nécessaire de disposer d'une loi de commande permettant

in real time. The calculations done in WAPITI allow him to generate this function, which may be stored in a read-only memory of the control system and called whenever there is a change in internal or external conditions.

The results of this study will be the subject of a doctoral thesis to be defended at the École des Ponts et Chaussées, Paris, in spring 1985.

de piloter l'installation en temps réel. Les calculs entrepris dans WAPITI permettent de générer cette loi, qui pourra être entreposée dans une mémoire morte du système de contrôle, et appelée à chaque modification des conditions internes ou externes.

Les résultats de cette étude feront l'objet d'une thèse de doctorat soutenue à l'École des Ponts et Chaussées, Paris, au printemps 1985.

A NEW INTERSEASONAL STORAGE CONCEPT FOR SOLAR HEAT APPLICATIONS IN PRIVATE BUILDINGS IN MODERATE CLIMATES

NOUVEAU CONCEPT DE STOCKAGE INTERSAISONNIER DE LA CHALEUR SOLAIRE DANS LES BÂTIMENTS PRIVÉS EN CLIMAT TEMPÉRÉ

H. Weik and J. Plagge
Fachhochschule Lübeck
Lübeck, F.R.G.

Since the summer of 1982, a solar heated single-family home with 130m^2 heated area has been in operation at the site of the Fachhochschule Lübeck, in which a new storage concept for solar heat was realized. As a result, the normal insolation surplus during summer is equally well controlled and handled as the insolation deficiency in winter, typical for the North-European climate.

This was achieved by a heat pump assisted solar heating system centered around a double storage unit, consisting of two water tanks of different size and temperature level: a tank of about 4m^3 volume, kept at 35°C to 50°C, satisfies the heat demand of the low-temperature heating system of the house; the second tank (20m^3 volume) serves as heat reservoir and - in mid-winter - as heat source for the heat pump, the size of which could be limited to 2 kW driving power. In this mode of operation, this tank acts as a latent heat storage device for the water-ice phase change with a maximum storage capacity of some 2000 kWh.

The first three heating seasons proved the feasibility of the concept and also validated all expectations as to general and insolation economics. Particularly, as to the latter aspect, the inherent pecularity of the double-storage system shows its merits in that the low temperature of the storage medium during the phase change process allows the collector field (size 30m^2) to collect even very small solar radiation rates with high efficiency, providing a continuous supply of low-grade solar heat (so-called energy), necessary to operate the heat pump. This permits keeping both the collector field and the volume of the heat-reservoir tank within an economically reasonable size. The solar surplus during May/June is used to melt the ice, and during July/August to heat the

Depuis l'été 1982, une maison unifamiliale de 130 m^2, dotée d'un stockage de la chaleur solaire d'un concept nouveau, a été chauffée à l'énergie solaire sur l'emplacement du Fachhochschule Lübeck. Le surplus d'ensoleillement normal en été est utilisé pour compenser le manque d'ensoleillement en hiver, typique du climat nord-européen.

Cela a été rendu possible grâce à un système de chauffage solaire assisté d'une pompe à chaleur reliée à un stockage à deux réservoirs d'eau de dimensions et de températures différentes. L'un des réservoirs, d'environ 4 m^3, maintenu à une température de 35 °C à 50 °C, satisfait la demande de chaleur du chauffage basse température de la maison. L'autre réservoir, de 20 m^3, sert de réservoir de chaleur et, au milieu de l'hiver, de source chaude pour la pompe à chaleur, dont la puissance peut être limitée à 2 kw. Le deuxième réservoir stoke la chaleur latente pour le changement de phase eau-glace et a une capacité de stockage maximale d'environ 2 000 KWh.

Les trois premières saisons de chauffage ont démontré l'efficacité du concept et confirmé toutes les prévisions de récupération d'énergie solaire ou autre. En particulier, ce système à deux réservoirs a un avantage particulier qui fait que la basse température de l'eau stockée au cours du processus de changement de phase permet au champ de capteurs (dim. 30 m^2) de tirer profit d'un ensoleillement très faible avec une grande efficacité, fournissant ainsi un approvisionnement continu en chaleur solaire de bas niveau, nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur. Cela permet de maintenir le champ de capteurs et le réservoir de chaleur à des dimensions économiquement réalistes. Le surplus d'ensoleillement en mai et juin sert à faire

storage water to its useful temperature level for the new heating season.

The combined collector - double storage - heat pump system performed excellently: only about 5000 kWh of auxiliary energy were needed during the heating period; i.e. about 75% of the total thermal load for space heating and domestic hot water demand in this experimental house (though used by a real family of four) could be met by solar energy.

These very encouraging results meanwhile stimulated a prospective home-owner in the climatically more favorable Frankfurt area to adopt the twin-storage concept of heating for his house, which, at present, is under construction and will have a 4/30m^3 storage unit.

fondre la glace et en juillet et août, à chauffer l'eau du stockage jusqu'au niveau de température utile pour la prochaine saison de chauffage.

Le système combiné capteurs-stockage à deux réservoirs-pompe à chaleur a un excellent rendement: la saison de chauffage n'a nécessité qu'environ 5 000 KWh d'énergie d'appoint, autrement dit l'énergie solaire a pu fournir 75 % des besoins totaux en chauffage et eau chaude de cette maison expérimentale habitée par une famille de quatre personnes.

Ces résultats très encourageants ont stimulé un propriétaire éventuel de la région de Francfort, au climat plus favorable, à adopter ce concept de stockage à deux réservoirs pour le chauffage de sa maison qui est actuellement en chantier et qui sera dotée d'un système de stockage à quatre réservoirs de 30 m^3.

THE GRONINGEN PROJECT: 96 SOLAR HOUSES WITH SEASONAL HEAT STORAGE IN THE SOIL

LE PROJET GRONINGEN: 96 MAISONS SOLAIRES AVEC STOCKAGE DE CHALEUR SAISONNIER DANS LE SOL

A.J. Th. M. Wijsman
TNO Institute of Applied Physics
Delft, The Netherlands

In Groningen, the Netherlands, a project with seasonal heat storage of solar heat in the upper layer of the soil has been realized. The project consists of 96 solar houses, each with 25 m^2 of high performance solar collectors mounted on the south facing roof, and a seasonal heat store of about 23,000 m^3 (depth 20 m) of water saturated sandy soil.

The seasonal heat store in the soil consists of a layer of soil in which a vertical tube heat exchanger is inserted. Only the top of the store is furnished with an insulation layer.

The Groningen project has been realized in two phases:

- The construction and testing of the seasonal heat store. In the second half of 1982 the seasonal heat store was built; experiments were done during 1983 with the aid of a boiler and a cooler, which respectively simulated the heat input and heat output of the heat store.

- Construction of the solar houses and the coupling to the seasonal heat store. The construction of the solar houses started in the autumn of 1983. The coupling to the heat store took place in the autumn of 1984 and by the end of 1984 the system was in full operation.

The paper will provide a description of the entire solar heating plant. Design backgrounds will be given in brief. The experience with the operation of the seasonal heat store which was gained from the experiments will be discussed.

Experimental data was used for the validation of the various computer models for the seasonal heat store. Some of the models describe the global heat transfer process in

Un stockage saisonnier de chaleur solaire dans la couche supérieure du sol a été réalisé à Groningen (Pays-Bas). Le projet comprend 96 maisons solaires équipées de 25 m^2 de capteurs à haut rendement orientés au sud et un stockage saisonnier d'environ 23 000 m^3 (profondeur de 20 m) de sol sableux saturé d'eau.

Le stockage saisonnier consiste en une couche de sol dans laquelle on a enterré un échangeur de chaleur à tubes verticaux. Seule la partie supérieure du stockage est calorifugée.

Le projet Groningen a été réalisé en deux étapes:

- Construction et mise à l'essai du stockage saisonnier. Le stockage saisonnier a été construit au deuxième semestre de 1982; des expériences ont été faites en 1983 en utilisant une chaudière et un refroidisseur pour simuler le stockage et l'extraction de chaleur.

- Construction des maisons solaires et raccordement au stockage saisonnier. La construction des maisons solaires a débuté à l'automne 1983. Le raccordement au stockage saisonnier s'est fait à l'automne 1984; à la fin de 1984, toute l'installation était en service.

Le présent document décrit toute l'installation de chauffage solaire et énonce brièvement les principes de conception. Il contient aussi un commentaire sur l'expérience tirée du stockage thermique saisonnier.

Des données expérimentales ont été utilisées pour la vérification de différents modèles informatiques de simulation du stockage saisonnier. Certains de ces modèles

and around the heat store. Others take the local heat transfer process around the heat exchanger tubes into account. The main results of this validation work will be shown.

Finally, the experience with the first half year of system operation will be discussed.

To get enough information about the operation of the plant, the entire system will be monitored until the spring of 1986.

décrivent le processus de transfert thermique global à l'intérieur et autour du stockage. D'autres tiennent compte du processus de transfert de chaleur localisé autour des tubes de l'échangeur de chaleur. Le document donne les principaux résultats de ces travaux de vérification.

Enfin, on traite de l'expérience du premier semestre d'exploitation de l'installation.

L'installation sera maintenue sous surveillance jusqu'au printemps 1986 afin de recueillir suffisamment de données sur l'exploitation.

WATER/
EAU

J. Michael Wiggin, B.A.Sc., P.Eng.
Canadian Centre for Mineral and Energy Technology
Combustion and Carbonization Research Laboratories
Energy, Mines and Resources Canada
Ottawa, Canada

Robert Cohen, Graduate in Physics,
M.Sc. in Energy Conservation
Applied Energy Group
School of Mechanical Engineering
Cranfield Institute of Technology
Cranfield, United Kingdon

HEAT STORAGE IN CAVERNS, TANKS AND PITS: AN OVERVIEW OF SWEDISH EXPERIENCES

STOCKAGE DE CHALEUR DANS LES CAVERNES, LES RÉSERVOIRS ET LES PUITS: SURVOL DE L'EXPÉRIENCE SUÉDOISE

Gunnar Gustafson
Viak AB
Gothenburg, Sweden

Within the Swedish research and development effort on heat storage for domestic and district heating several experiments and demonstration projects have been completed. Among the tested techniques is storage of hot water in rock caverns, tanks and pits. Totally about five plants with individual storage volumes of more than 5 000 m^3 have been constructed. The experiences from these range from two to five years of operation. For the research field an evaluation group has been established, and the paper will give the state of the art in Sweden based on its findings. The following subjects will be treated:

1. Technical Solutions and Project Review

The principal technical solutions for storage of hot water will be described and exemplified with different demonstration plants. Their technical data and performance will be presented.

2. Technical Problems

In the pilot plants technical problems of various kinds have arisen. Some of them have been possible to counter act during operation, others are implied in the different technical solutions. These technical problems are discussed. The solution of these problems implies further research work.

3. Environmental Problems

The influence on the environment of hot water storage is not expected to be of great significance. The influence has been studied at one of the plants and the results are described.

Plusieurs expériences et projets de démonstration ont été mis en oeuvre dans le cadre du programme suédois de recherche et développement en matière de stockage thermique appliqué au chauffage domestique et urbain. On a mis à l'essai des techniques de stockage d'eau chaude dans des cavités rocheuses, des réservoirs et des puits. On a construit en tout cinq installations ayant un volume individuel de stockage de 5 000 m^3 et les expériences sont basées sur des durées de fonctionnement allant de deux à cinq ans. On a formé un groupe d'évaluation de la recherche et ce document donne un aperçu de la situation actuelle en Suède à partir des résultats de ses recherches. Les sujets suivants seront abordés:

1. Solutions techniques et examen du projet

Les principales solutions techniques pour le stockage d'eau chaude sont examinées avec des données sur les diverses installations de démonstration. Présentation de données techniques et les caractéristiques de rendement.

2. Problèmes techniques

On a remarqué divers types de problèmes techniques dans les installations pilotes. Certains ont pu être corrigés en cours de fonctionnement et d'autres ont fait l'objet de recherches techniques. Ces questions sont abordées en détail. La solution de ces problèmes nécessitera de plus amples recherches.

3. Problèmes écologiques

L'influence du stockage d'eau chaude sur le milieu ne joue pas un rôle primordial. Cette question a fait l'objet d'études à l'une des installations et les résultats de recherche sont présentés.

4. Economy and Potential

Since several demonstration plants have been in operation for a period both the construction and operation costs are well known. It is also known that cost reductions must be made to make the use of hot water storage common. The paper describes present construction and operation costs for different technical solutions and also the suggested technical modifications suggested to reduce construction costs.

4. Potentiel et considérations économiques

Étant donné que plusieurs installations de démonstration fonctionnent déjà depuis un certain temps, on peut facilement en évaluer les coûts de construction et d'exploitation. On sait aussi qu'il faudrait réduire les coûts pour étendre l'utilisation de ces installations. Ce document présente les coûts de construction et d'exploitation de diverses solutions techniques ainsi que les modifications techniques suggérées pour réduire les coûts de construction.

AN EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECTS OF AN INLET DIFFUSER ON PERFORMANCE OF HORIZONTAL CYLINDRICAL HOT WATER STORAGE TANK

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE DES EFFETS D'UN DIFFUSEUR D'ADMISSION SUR LE RENDEMENT D'UN RÉSERVOIR CYLINDRIQUE HORIZONTAL DE STOCKAGE D'EAU CHAUDE

Dominique C. Burgeff, Maurice W. Wildin
University of New Mexico
Albuquerque, U.S.A.

Several inlet flow diffusers designed to help maintain the thermocline in water-filled horizontal cylindrical storage tanks were evaluated experimentally. The designs all used equal area circular discharge ports; in most cases the ports were evenly distributed along the header. Variations in the design, such as the number of ports, the diameter of the header, and the use of an outer concentric slotted sleeve were investigated.

The study used a scale-model acrylic tank. Although the tank was geometrically scaled to about half the actual size, both the inlet-outlet temperature difference and the relative magnitude of buoyancy to inertia effects were preserved. The water in the tank was heated to 49°C (120.2°F) before removal took place. City water at a temperature of about 25°C was used as makeup water.

The above mentioned designs were analyzed both qualitatively and quantitatively via flow visualization techniques, tank inlet and outlet temperature data and water temperature distribution data obtained during hot water removal. Flow visualization revealed some deficiencies in the designs in that the linear distribution of the discharge flow was not uniform and the discharge flow momentum was too high. Two measures of stratified tank performance were employed. The first one was based upon the percent of the tank volume the user could draw at a fairly constant temperature of 48°C (118.4°F), at a flow rate of 0.78 gpm corresponding to a full-scale flow rate of 4.0 gpm. From that standpoint, the new designs outperformed the reference design, resulting in an increase of 24 to 46% of the volume of hot water drawn from the tank. The second performance coefficient was the ratio of the actual

Plusieurs diffuseurs d'admission conçus pour maintenir la thermocline dans les réservoirs cylindriques horizontaux de stockage de l'eau chaude ont été évalués de façon expérimentale. Tous les modèles mis à l'essai comportaient des orifices de sortie circulaires de même surface. Dans la plupart des cas, les orifices étaient répartis uniformément le long de la canalisation principale. Des variantes de conception (modification du nombre d'orifices et du diamètre de la canalisation principale, et utilisation d'un manchon extérieur à fentes concentriques) ont aussi été étudiées.

L'analyse a porté sur un réservoir à échelle réduite en acrylique. Bien que le réservoir ait été réduit à environ la moitié des dimensions réelles, l'écart de température entre l'entrée et la sortie ainsi que l'importance relative de la flottabilité et des effets de l'inertie ont été préservés. L'eau du réservoir a été chauffée à 49 °C (120.2 °F) avant que la vidange commence. De l'eau de la ville à 25 °C était utilisée comme eau d'appoint.

Les modèles et variantes mentionnées précédemment ont été évalués quantitativement et qualitativement grâce à des techniques de visualisation de l'écoulement, aux températures d'admission et de sortie et aux données de répartition des températures recueillies lors de la vidange de l'eau chaude. La visualisation de l'écoulement a révélé certains des défauts des diffuseurs à l'étude: la répartition linéaire de l'écoulement de sortie n'était pas uniforme et l'énergie cinétique de cet écoulement était trop élevée. Deux mesures du rendement des réservoirs à stratification ont été analysées. La première était basée sur le pourcentage du volume du réservoir que l'usager pourrait extraire à une température relativement constante de 48 °C (118.4 °F) et à un débit de 0.78 gal./mn, ce qui correspond à un débit de vidange de 4.0 gal./mn dans un réservoir en vraie grandeur. Si l'on se fie

energy drawn from the tank to that drawn for an ideal case under the same conditions. In that respect, the new designs were 13 to 25% more efficient than the reference design. The design taken as reference is currently being used in a commercial solar domestic water heater unit.

à cette mesure, les nouveaux modèles analysés sont supérieurs au diffuseur de référence puisqu'ils permettent d'augmenter de 24 à 46 % le volume d'eau chaude extrait du réservoir. La seconde mesure de rendement était le rapport de l'énergie réelle prélevée du réservoir à la quantité d'énergie qui aurait pu être prélevée dans la meilleure éventualité et dans les mêmes conditions. Sous cet aspect, les nouveaux modèles sont de 13 à 25 % plus efficaces que le modèle de référence; ce dernier est actuellement utilisé dans une installation commerciale de chauffage solaire d'eau chaude sanitaire.

Hence, the present study was successful in that it exposed several trends for further optimization in inlet flow diffuser design, aimed at producing and preserving a thermocline in a horizontal tank with curved or sloping side walls and possibly operating at different temperature ranges. It also revealed some problems inherent to the cylindrical shape of the tank in producing a thin thermocline as well as the difficulty in achieving a simple diffuser design yielding a uniform discharge flow distribution. Nevertheless, the potential for improvement in the performance of heated and cooled tanks through further studies is foreseen as considerable.

L'étude décrite dans le présent document a donc été couronnée de succès puisqu'elle a permis de mettre le doigt sur certains points à améliorer en vue du perfectionnement des diffuseurs d'admission, de façon qu'ils puissent former et préserver une thermocline dans les réservoirs horizontaux à parois latérales incurvées ou inclinées et, éventuellement, qu'ils fonctionnent à différentes plages de températures. L'étude a également révélé des problèmes inhérents à la forme cylindrique du réservoir, qui produit une thermocline mince et qui complique la conception d'un diffuseur simple, capable de réaliser une répartition uniforme de l'écoulement de sortie. Quoi qu'il en soit, les possibilités d'amélioration, grâce à d'autres études, du rendement des réservoirs chauffés et refroidis semblent considérables.

EXPERIMENTAL STUDY OF A STORAGE RESERVOIR SIMULATION MODEL

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE D'UNE MAQUETTE SIMULANT UN RÉSERVOIR DE STOCKAGE

L. Cayron, S. Pauzin
ONERA-CERT/D.E.R.M.E.S.
Toulouse, France

Research conducted in a basin on an actual site enabled us to produce a general model of a storage facility and to learn about its thermal behaviour.

In order to improve upon these studies and, in particular, to examine a reservoir that includes injection and tapping, research was conducted using a model.

First, by writing equations that govern thermal and dynamic transfer, we were able to define the simulation parameters for seepage, limiting conditions and geometric configuration. Radiative transfer was also taken into account in this study.

Experiments carried out using a solar simulator (described elsewhere) and a system of probes provided access to the thermal field.

The vertical distribution of temperatures and the response times for each were obtained for many configurations with and without covers:

- homogeneous storage with and without tapping;
- insolated homogeneous storage with and without tapping;
- stratified storage with and without tapping;
- stratified and insolated storage with and without tapping;

The findings were analysed and compared with those cited in the literature and those obtained on site.

The proposed simulation seemed satisfactory enough for us to consider more complete

Des recherches menées sur un bassin en site réel, ont permis d'établir un modèle global du stock et de connaître l'évolution thermique de celui-ci.

Afin d'afiner ces études et notamment considérer un réservoir comportant une injection et un soutirage, une recherche a été engagée sur une maquette.

Dans un premier temps, l'écriture des équations régissant le transfert thermique et dynamique, nous a amené à la définition des paramètres de similitude pour l'écoulement, les conditions aux limites et la configuration géométrique. Le transfert radiatif a également été pris en compte dans l'étude.

Les expérimentations sont réalisées à l'aide d'un simulateur solaire, caractérisé par ailleurs et nous permettent, grâce à un système de sondes, d'accéder au champ thermique.

Les distributions verticales de températures et les temps de réponses associés à chaque capteur sont obetnus pour plusieurs configurations avec et sans couverture:

- stock homogène avec et sans soutirage;
- stock homogène insolé avec et sans soutirage;
- stock stratifié avec et sans soutirage;
- stock stratifié et insolé, avec et sans soutirage.

Les résultats de mesure sont analysés et comparés à ceux de la littérature et à ceux obtenus sur site.

La similitude proposée paraît satisfaisante pour pouvoir envisager des études

studies of the parameters involved in the operation of this type of storage facility (effect of the positioning of the inlets/outlets, covers and so on.)

paramétriques plus complètes sur le fonctionnement de ce type de stock (influer de la position des entrées/sorties, des couvertures, etc.).

SYNERGISM OF A THERMAL ENERGY STORE WITH A CENTRAL-HEATING BOILER

COMBINAISON D'UN STOCKAGE THERMIQUE AVEC UNE CHAUDIÈRE DE CHAUFFAGE CENTRAL

R.R. Cohen, D.M. Tanton, S.D. Probert
Cranfield Institute of Technology, Bedford, United Kingdom
D.J. Nevrala
British Gas Corporation, London, United Kingdom

Background

Hydronic central-heating boilers are more efficient, cheaper and less bulky than their predecessors of twenty years ago. In addition, system controls are now far more sophisticated and effective than they used to be, due to the prolonged experience gained, the better understanding of system behaviour and the availability of cheap microelectronics. However, boilers have to be sized to cope with maximum heat-demand conditions and are therefore far too large for most of the heating season, particularly in intermittently-heated buildings requiring fast pre-heating. Apart from the extra cost of an unnecessarily-high output boiler, frequent boiler cycling (maybe 50,000 cycles during one year) with the associated flue and case losses during the 'off' portion of each cycle reduces the achievable fuel efficiency.

Historique

Les chaudières de chauffage central à eau chaude sont plus efficaces, moins coûteuses et moins volumineuses que celles d'il y a vingt ans. De plus, la régulation des systèmes est maintenant beaucoup plus perfectionnée et plus efficace qu'à cette époque grâce à l'expérience acquise au fil des ans, à la meilleure compréhension du comportement des systèmes et à l'apparition de micro-ordinateurs peu coûteux. Quoi qu'il en soit, la puissance des chaudières doit être choisie en fonction des conditions de demande de pointe, elles sont donc beaucoup trop puissantes pour la plus grande partie de la saison de chauffage, en particulier dans les bâtiments chauffés par intermittence, qui demandent un pré-chauffage rapide. En plus du coût supplémentaire que représente une chaudière inutilement puissante, les fréquents cycles de marche-arrêt (jusqu'à 50 000 par année) réduisent le rendement énergétique réalisable en raison des pertes de chaleur par le conduit de fumée et par l'enveloppe pendant les périodes d'arrêt.

The heat-storage solution

The installation of a heat store in the thermal circuit between a boiler and its thermal-demand load (which is capable of absorbing at maximum around 2 hours of full output from the boiler) would:

- reduce, by at least 40%, the boiler capacity required for a given building;
- increase the annual boiler efficiency to almost its peak, full-load value;
- allow rapid building pre-heating to occur;
- simplify the necessary system controls; and

Une solution: le stockage thermique

L'incorporation d'une installation de stockage (capable d'emmagasiner l'eau chaude produite pendant au maximum 2 heures par la chaudière à pleine puissance) sur le circuit thermique en aval de la chaudière:

- réduit d'au moins 40 % la puissance nécessaire de la chaudière pour un bâtiment donné;
- augmente le rendement annuel de la chaudière à presque sa valeur optimale à pleine charge;
- permet le pré-chauffage rapide du bâtiment;
- simplifie la régulation; et

- help smooth the early morning peak demand on gas distribution networks, allowing more customers to be supplied by the existing distribution mains.

The field trials

The Energy Technology Support Unit of the U.K. Department of Energy and the British Gas Corporation have collaborated with the Cranfield Institute of Technology to assess the benefits from this use of heat storage by supporting financially a full-scale field trial at Spa School, London. The performance of the school's heating system has been monitored comprehensively during consecutive winters, i.e. before and after the installation of a 3300 litre hot-water store and the simultaneous removal from service of 2 out of a set of 5 modular boilers.

Results

This paper analyses the improvements in overall system efficiency achieved by the introduction of the heat storage and the influence of system flow rate and control strategy on the efficiency. The monitored data have been used to validate and refine computer simulations of such heating systems both with and without storage. Parameter sensitivity studies (i.e. the effects on the efficiency of variations of the influential parameters) are briefly described. Finally, the thermal performance results are incorporated in an economic assessment of the worthwhileness of the technology, and conclusions are drawn as to which applications are most likely to be attractive financially.

- contribue à diminuer la demande de pointe imposée aux réseaux de distribution de gaz en début de matinée, ce qui permet de raccorder un plus grand nombre aux canalisations d'alimentation existantes.

Essais

L'Energy Technology Support Unit du ministère de l'Energie du Royaume-Uni, ainsi que la British Gas Corporation ont collaboré avec le Cranfield Institute of Technology afin d'évaluer les avantages d'un tel stockage thermique en apportant leur appui financier à des essais en vraie grandeur à l'école Spa de Londres. Le rendement de l'installation de chauffage de l'école a été surveillé minutieusement au cours d'hivers consécutifs, c'est-à-dire avant et après l'installation d'un réservoir de stockage d'eau chaude de 3 300 litres et la mise hors service simultanée de 2 des 5 chaudières modulaires en place.

Résultats

Le présent document analyse les améliorations du rendement global réalisées grâce à l'incorporation du stockage thermique ainsi que les effets du débit et du mode de régulation sur le rendement de l'installation. Les données recueillies ont été utilisées pour vérifier et perfectionner les simulations informatiques de ces installations de chauffage avec ou sans stockage thermique. Des analyses de sensibilité aux paramètres (effets des variations de certains paramètres sur le rendement) sont brièvement décrites. Enfin, les résultats de rendement technique obtenus sont incorporés à une analyse économique de cette technique et on conclut sur les applications qui sont le plus susceptibles d'être rentables.

DESIGNING THE MOST COST-EFFECTIVE THERMAL STORAGE FOR COOLING IN NEW BUILDINGS

CLIMATISATION: QUEL STOCKAGE?

Olivier de la Morinière
Agence Francaise pour la Maîtrise de l'Energie, Paris, France
Visitor to Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, U.S.A.

This paper presents a theoretical analysis of the most cost-effective thermal storage systems and several case histories. The cost-effectiveness of a thermal energy storage system for cooling depends on its design parameters. These design parameters include: type of storage, mode of operation, initial cost, and energy-and-power savings.

The "coolth" supplied by the chiller can be stored in various storage systems: chilled water, ice tanks, phase-changing materials or concrete hollow-core floor slabs ("Thermodeck"). Any combination of these systems can be designed.

The mode of operation may be full storage, partial storage or demand-limited storage. This selection procedure will determine both the size of the storage (in ton-hours) and the avoided chilling capacity (in tons).

The initial cost of a system is represented roughly by the cost of the storage minus the cost of the avoided chilling capacity. Both first-cost and operating costs can be reduced in three cases: some partial storage systems, Thermodeck, and coupling an existing building without storage but with an oversized chiller which operates at peak time, with a new "paired" building with adequate storage for both buildings but no chiller. In more common cases, like chilled water or ice storage, an economic analysis shows that partial storage usually has the lowest first cost (at about $200/kW displaced from peak).

The dollars savings depend sharply on the specific utilities rates because they come from the avoidance of peak-kW and the shift

Ce papier présente une étude théorique des procédés les plus rentables de stockage de l'énergie thermique pour la climatisation des bâtiments et décrit quelques exemples réels. La rentabilité d'un stockage thermique dépend essentiellement des paramètres suivants: type de stockage, mode de fonctionnement, investissement, et économies induites (de puissance, voire d'énergie).

Le "froid" produit par le climatiseur peut être stocké dans divers types de stockage: de l'eau à basse température, de la glace, des matériaux à changements de phase, ou des planchers ou structures en béton creux; toute combinaison de ces procédés peut être imaginée.

Le mode de fonctionnement peut être un stockage complet, un stockage partiel ou encore un stockage dit "hors périodes de pointe". Le choix de ce mode détermine de facto à la fois la capacité de stockage (en KWh) et l'économie réalisée sur la puissance installée (en KW).

L'investissement se décompose approximativement en deux parties: le coût du stockage auquel il faut soustraire l'économie réalisée grâce à la faible puissance installée. Par rapport à un système traditionnel, il est possible de réduire simultanément l'investissement initial et le coût de fonctionnement, dans au moins trois cas: certains stockages partiels, des planchers de type "Thermodeck", et "marier" un bâtiment existant sans stockage mais avec climatiseur avec un bâtiment voisin, neuf, avec stockage mais sans climatiseur. Dans les exemples plus usuels une analyse économique montre que le stockage partiel induit le plus faible investissement initial (environ 200 $/KW déplacé des périodes de pointe).

Les économies financières réalisées dépendent très fortement de la tarification appliquée, car elles proviennent d'une baisse de la

of kWh from expensive peak periods. Cool storage saves dollars but rarely energy. Energy consumption is sometimes worse because the system has thermal losses and imperfect control but sometimes the efficiency is better. In some cases and climates, the storage can be charged with the free coolth of the night's outside air, almost totally eliminating the energy consumption. In most cases, however, partial storage systems have the shortest payback time and their life cycle costs compete with demand-limited storage systems. The "shoulder effect" of half-peak rates can scarcely justify full storage systems over demand-limited storage.

We will discuss these design parameters in the context of several case studies of thermal storage systems.

puissance de pointe appelée et du glissement de KWh de pointe vers les heures creuses. Le stockage permet des économies financières et des économies de puissance appelée mais rarement d'énergie: parfois ils consomment plus d'énergie à cause des problèmes de régulation et de prévision et parfois moins car le rendement est amélioré. Dans certains cas le stockage peut être rechargé par l'air frais de la nuit, réduisant presque à zéro l'énergie consommée. Dans tous les cas, les stockages partiels ont le temps de retour le plus bref et, au niveau du "life cycle cost", ont des performances semblables au systèmes "hors périodes de pointe". Les stockages complets ne sont que très rarement justifiés.

Plusieurs exemples réels nous aideront à présenter l'influence de chacun de ces paramètres.

STRATIFIED OPERATION OF A 500 m^3 TEST PIT

EXPLOITATION DE LA STRATIFICATION D'UN PUITS D'ESSAI DE 500 m^3

K. Kielsgaard Hansen, P. Nordgaard Hansen and Vagn Ussing
Technical University of Denmark
Lyngby, Denmark

Design, construction and testing of a 500 m^3 warm water pit have been carried out. In the results reported so far the water temperature has been fully mixed to simplify the calculations of the temperatures in the surrounding soil. This paper describes a stratified cycle in the water.

The store is situated on the campus of the Technical University in Lyngby, Denmark.

The pit with a truncated pyramidal geometry has been dug into the ground from the ground level. The store/soil interfaces were made waterproof by using a 2.5 mm high density polyethylene liner. No insulation materials were used. The floating lid is heat insulated and protected against evaporation from the pit and against climatic conditions by use of a 2.5 mm HDPE liner and a butyl rubber liner. The heat input to the water in the pit is generated by a gas burner allowing simulation of solar collectors.

Approximately 80 thermocouples measure the temperatures of the water and the soil under and around the pit. In the water, a moveable 1.7 m long tube with 14 thermocouples measures the location of the thermocline.

A finite difference technique for calculating temperatures in the water and in the surrounding soil is used.

The temperature variation in the water is simulated using the superposition principle to separate the influence of the convective movement caused by water inlet/outlet and the thermal effects of heat conduction in the water plus heat losses to the ground.

On a conçu et mis à l'essai une fosse d'eau tiède, de 500 m^3. Selon les résultats relevés jusqu'ici, la température de l'eau a été homogénéisée afin de simplifier le calcul des températures du sol environnant. Le présent rapport décrit un cycle par niveaux dans l'eau.

Le réservoir est situé sur le campus de l'université technique de Lyngby, au Danemark.

La fosse, en forme de pyramide tronquée, a été creusée dans le sol à partir du niveau du sol. On a utilisé un enveloppe en polyéthylène haute densité de 2.5 mm d'épaisseur pour l'étanchéité des parois, mais aucun matériau isolant. Le couvercle flottant est calorifugé et protégé contre les pertes par évaporations et contre les conditions climatiques par une garniture en polyéthylène haute densité et par une autre en caoutchouc au butyle. Le réchauffement de l'eau de la fosse est réalisé par un brûleur à gaz simulant des capteurs solaires.

Environ 80 thermocouples mesurent la température de l'eau et du sol en dessous et autour de la fosse. Un tube mobile, de 1.7 m de long, muni de 14 thermocouples, sert à déterminer l'emplacement des thermoclines dans l'eau.

Une méthode des éléments finis sert au calcul des températures dans l'eau et dans le sol environnant.

La variation de température dans l'eau est simulée selon le principe de la superposition afin de séparer l'influence des mouvements de convection causés par l'injection et le pompage de l'eau, et les effets thermiques de la conduction dans l'eau en plus des pertes de chaleur dans le sol.

The experimental results as well as results of numerical simulations for one charge and discharge operation will be presented.

The construction was financed by the Danish Ministry of Energy and was started at the end of June 1982. The design and the testing were financed partly by the CEC, Bruxelles, partly by the Danish Council for Scientific and Industrial Research, and partly by the Danish Ministry of Energy.

Les résultats expérimentaux ainsi que les résultats de simulation numérique d'une opération de stockage et de restitution, seront présentés.

Les travaux de construction ont été financés par le ministère de l'énergie du Danemark, et ont débuté à la fin de juin 1982. La conception et les essais ont été financés conjointement par le CCE, à Bruxelles, par le Conseil de la recherche scientifique et industrielle du Danemark et par le ministère de l'énergie du Danemark.

GENERAL THEORY OF HEAT AND COLD STORAGE

THÉORIE GÉNÉRALE DU STOCKAGE DE LA CHALEUR ET DU FROID

P.N. Hansen
The Technical University of Denmark
Lyngby, Denmark

Analytical theory describing the heat (or cold) loss from the different types of thermal storage systems will be presented, (tank, pit, cavern, earth, aquifer). Both short term and long term storage aspects will be analysed.

The paper will concentrate mostly on simple storage geometries like plate, cylinder and sphere. This is to obtain simple analytical heat/cold loss expressions (no integral formulations).

The paper will be an extension of the paper on "Analytical Description of the Heat Losses from Underground Thermal Seasonal Heat Stores" presented at the International Conference on Seasonal Thermal Energy Storage and Compressed Air Energy Storage, October 19-21, 1981, Seattle, Washington.

On présente dans ce document la théorie analytique permettant de décrire les pertes de chaleur (ou de froid) de différents types de stockage thermique (réservoir, cavité rocheuse, sol, aquifère). Les aspects du stockage à court terme et à long terme ont également été étudiés.

Le document porte essentiellement sur les réservoirs de stockage de forme géométrique simple: (plaque, cylindre, sphère). Il s'agit de trouver les expressions simples représentant les pertes de chaleur ou de froid (et non des formules intégrales).

Ce document est un supplément au document intitulé "Description analytique des pertes de chaleur des réservoirs thermiques saisonniers souterrains" présenté à la conférence internationale sur le stockage de l'énergie thermique saisonnier et sur le stockage de l'énergie par air comprimé, qui s'est tenue du 19 au 21 octobre 1981 à Seattle, Washington.

HEAT STORAGE AND EXTRACTION FROM THE ABANDONNED WATERFILLED MINES IN NORBERG, SWEDEN: IDEA AND EXPERIENCES

STOCKAGE ET EXTRACTION DE CHALEUR DANS LES MINES ABANDONNÉES REMPLIES D'EAU DE NORBERG EN SUÈDE: IDÉE ET EXPÉRIENCES

Peter Kjaerboe
Viak AB (Consulting Engineers)
Stockholm, Sweden

A description of the mines, the design and some experiences from the plant are given. The heat extraction system consists of piping in one shaft, a heat exchanger which is necessary due to the chemistry of the mine water, and a cold water distribution system. In the first phase, built in 1984, the distributed water is used as heat source for five heat pumps in different buildings. The city of Norberg is situated on top of the mines.

The mining stopped in 1981 due to a decreasing market. The drainage stopped and the mines are slowly being filled with water and expected to be full in 1986. The water volume will be approximately 1 800 000 m^3. Calculations show that heat can be extracted up to 2 MW with loading using warm summer water from a nearby lake up to 200 kW average without loading. The heat source demand of the first phase is approximately 2 MW with loading estimated at 200 kW. It will thus be necessary to start reloading within a few years.

In the next phase, the heat storage project will be combined with cooling of drinking water in summer. This is necessary as surface water of the lake is used as raw water supply.

On donne ici une description de la mine, de la conception et des essais de l'installation. L'extraction de chaleur se fait par une tuyauterie dans un puits et utilise un échangeur de chaleur (à cause de la composition chimique de l'eau dans la mine) et un réseau de distribution d'eau froide. Dans la première phase, construite en 1984, l'eau sert de source chaude pour cinq pompes à chaleur placées dans différents bâtiments. La ville de Norberg est située au-dessus.

L'exploitation de la mine s'est arrêtée en 1981 à cause de la tendance à la baisse du marché. L'évacuation des eaux n'étant plus assurée, les galeries se remplissent progressivement d'eau et seront pleines en 1986. Le volume d'eau sera d'environ 1 800 000 m^3. Les calculs ont montré que l'on peut extraire jusqu'à 2 MW de chaleur en utilisant en été l'eau chaude provenant d'un lac situé à proximité et jusqu'à 200 kW en moyenne sans cet apport. Le besoin énergétique de la source de chaleur dans cette première phase est d'environ 2 MW avec un gain thermique estimé à 200 kW. Il sera donc nécessaire de prévoir un apport thermique dans quelques années.

Dans la prochaine phase du projet, le stockage de la chaleur sera combiné au refroidissement de l'eau potable en été. Cette opération est nécessaire du fait que l'eau de surface du lac est utilisée comme eau d'alimentation.

THE AVESTA RESEARCH PLANT FOR HOT WATER STORAGE - SUMMARY OF RESEARCH 1982-1985

STOCKAGE D'EAU CHAUDE À AVESTA (SUÈDE) - RÉSUMÉ DES RECHERCHES EFFECTUÉES DE 1982 À 1985

Dr. Jüri Martna
Swedish State Power Board
Vällingby, Sweden

This research plant for hot water storage in an unlined rock cavern is situated in the town of Avesta in central Sweden. Its design and the research program have been described previously. The plant has been in operation since May, 1982. The planned research program has been carried out using four-month temperature cycles from 30 to 93°C and two-week cycles from 70 to 115°C, respectively. After 20 months of operation the cavern was opened for inspection.

Upon heating, the whole rock mass surrounding the cavern underwent an upheaval of 5-10 mm, measured at the ground surface. The rock is still moving and the strains are increasing, whereas the stresses seem to be stabilizing at around 6 MPa. The rock behavior is in general accordance with FEM calculations.

The thermally induced currents in the stored water along the cavern walls are less than theoretically anticipated and seem to have a comparatively moderate influence on the thermal layering. The heat losses are in general agreement with theoretical values. The heat transport by ground water has a limited influence on the energy balance.

During the filling of the storage cavern the water was desalted. As anticipated, mineral substances have been dissolved from the cavern walls. There have been no problems due to deposits in the pumps or heat exchangers. All deposition of minerals has taken place in the cavern.

Carbon steel, galvanized steel and aluminum have a rather limited durability. Stainless steel and copper alloys have a good resistance to corrosion.

Cette installation de stockage d'eau chaude en cavité rocheuse sans revêtement des parois est située à Avesta, ville du centre de la Suède. Les caractéristiques de conception et les détails du programme de recherche ont déjà été décrits. Ce stockage est en service depuis mai 1982. Les recherches ont porté sur des cycles de quatre mois avec des températures de 30 à 93 °C et sur des cycles de deux semaines avec des températures de 70 à 115 °C. La cavité rocheuse a fait l'objet d'inspections après 20 mois d'exploitation.

Le chauffage a provoqué un soulèvement de 5-10 mm dans la masse rocheuse adjacente à la cavité, mesuré par rapport à la surface du sol. Le roc bouge toujours et les déformations augmentent, mais les contraintes semblent se stabiliser à environ 6 MPa. Le comportement du roc est généralement conforme aux calculs établis par la méthode des éléments finis.

Les courants thermiques induits dans l'eau stockée le long des parois de la cavité sont plus faibles que prévu et ne semblent exercer qu'une influence moyenne sur la stratification thermique. Les pertes de chaleur correspondent généralement aux valeurs théoriques. Le transport de chaleur par les eaux du sous-sol influe très peu sur le bilan énergétique.

L'eau a été dessalée au moment du remplissage de la cavité du stockage. Les substances minérales présentes sur les parois se sont dissoutes comme prévu. On n'a remarqué aucun problème de dépôts dans les pompes ou les échangeurs de chaleur, tous les minéraux s'étant déposés dans la cavité.

On a constaté que l'acier au carbone, l'acier galvanisé et l'aluminium ont une durabilité assez limitée et que l'acier inoxydable et les alliages de cuivre ont une bonne résistance à la corrosion.

The inspection of the cavern showed that although a number of rockfalls had taken place, the roof had still a fundamentally stable arch. No installations were damaged. The condition of the cavern was as anticipated. Physiological studies were made on the working and diving conditions in the rather hot cavern.

L'inspection de la cavité a démontré que, malgré plusieurs éboulements, la voute était encore stable. Les installations n'ont subi aucun dommage et l'état de la cavité était tel que prévu. On a effectué des études physiologiques sur les conditions de travail et de plongée dans l'eau chaude de la cavité.

STRAINS IN THE ROCK AROUND AN UNLINED HOT WATER STORAGE CAVERN

DÉFORMATIONS DANS LE ROC AUTOUR DES CAVITÉS ROCHEUSES DE STOCKAGE D'EAU CHAUDE SANS CHEMISAGE

Göran Rehbinder
Swedish State Power Board
Vällingby, Sweden

When an unlined rock cavern is used as a hot water store the rock is exposed to thermal strains. The main threat to the stability of the rock is the fact that the temperature varies cyclically, since every load cycle can cause a small but permanent deformation.

An investigation of this phenomenon is being carried out at two hot water storage facilities in Sweden. In one of them, the Avesta plant (15000 m^3), the test period extends from the beginning of 1982. In the other one, the Lyckebo plant (100,000 m^3), the test period has been running from the beginning of 1983. The Avesta store is a conventional rock cavern, while the design of the Lyckebo store is unique, in that it is annular and the central pillar supports the overburden.

The results from the Avesta plant reveal that, during initial heating, compression develops in the rock at some distance from the cavern but this compression becomes expansion as the heating continues. The results also confirm the theoretical conclusion that cyclic loading only causes strain variations in the immediate vicinity of the cavern.

The investigations at the Lyckebo plant are concentrated to the central pillar. During initial heating the pillar is exposed to a clear axial compression. Like the Avesta plant this compression becomes expansion as heating continues. The rate at which this occurs is slower than for the Avesta cavern, since the time constant for a bigger cavern is larger.

The main conclusions that can be drawn at this stage of the investigations are that strains are mainly dictated by the average

Lorsqu'une cavité rocheuse sans chemisage est employée comme source d'eau chaude, la roche est exposée à des déformations thermiques. La principale menace pour la stabilité de la roche provient du fait que la température varie de façon cyclique. Chaque mise en charge au cours d'un cycle peut provoquer des déformations petites mais permanentes.

Une enquête est actuellement en cours en Suède concernant deux installations de stockage d'eau chaude. Dans l'une d'entre elle, la centrale d'Avesta (15 000 m^3), la période d'essais a commencé au début de 1982. Dans l'autre, la centrale de Lyckebo (100 000 m^3), la période d'essais a commencé au début de 1983. Le stockage d'Avesta est une cavité rocheuse classique, tandis que la conception du stockage de Lyckebo est unique en ce sens qu'il s'agit d'une galerie annulaire et que le noyau central supporte les terrains de recouvrement.

Les résultats de la centrale d'Avesta révèlent que, au cours de la phase initiale de chauffage, la roche est comprimée jusqu'à une certaine distance de la cavité rocheuse, mais que cette compression se traduit par une dilatation lorsque la chaleur augmente. Les résultats confirment également la conclusion théorique que les cycles de mise en charge causent seulement des déformations dans le voisinage immédiat de la cavité rocheuse.

Les recherches à la centrale de Lyckebo portent plus spécialement sur le noyau central. Au cours du chauffage initial, le noyau central est exposé à une compression axiale très forte. Comme à la centrale d'Avesta, cette compression se traduit par une dilatation lorsque la chaleur augmente. La vitesse de mise en compression est plus lente qu'à Avesta, car la constante est supérieure pour un volume plus important.

Les conclusions principales à ce stade des études sur place sont les suivantes: les déformations sont principalement dues à la

temperature of the stored water and not by the temperature variations. It is also concluded that comparatively large shear and normal strains occur at rock joints.

température moyenne de l'eau stockée et non aux variations de température, et il se produit un cisaillement relativement important mais des déformations normales dans les fissures de la roche.

A CONCISE METHOD FOR EVALUATING THE HEAT LOSS FROM BERMED HEAT STORAGE TANKS

UNE MÉTHODE CONCISE D'ÉVALUATION DES PERTES DE CHALEUR DE RÉSERVOIRS DE STOCKAGE THERMIQUE AMÉNAGÉS EN TALVO

M.A. Rosen and F.C. Hooper
University of Toronto
Toronto, Canada

Seasonally cycled heat storages find use in some solar energy and heat pump assisted systems. Examples of these storages include tanks, aquifers and caverns. Methodologies for the analysis of the heat loss characteristics of these long term storages have been studied over a number of years at the University of Toronto. In the present work tank storages, shaped as right-circular cylinders with vertical axes, using water as the storage medium, are considered. Such tanks may stand on grade, they may be buried flush with the surface of the ground, or they may be partially buried. In the latter case, the above-grade portion of the tank wall can be covered with a berm generally formed from part or all of the excavated material. The berm provides a degree of thermal insulation for the tank wall, some physical support for the tank wall, and good surface water drainage away from the tank.

In a previous paper, presented by the present authors at the Stockholm Conference in 1983, a graphical design aid was developed for predicting the effects of berms on the heat loss characteristics of these large seasonal storage tanks. The results were presented in the form of a "berm factor". Using this factor, the heat loss from a partially buried tank having a berm of any configuration can be calculated, expressed as a proportion of the heat loss from a tank of similar dimensions buried with its top flush with the surface of the ground. The berm factor was found to be dependent on several parameters, the most significant of which are the berm size and geometry, the thickness of tank insulation and the conductivity of the soil.

The focus of the development reported here was on rendering the previously developed design method both more general, and more convenient to use in engineering design. A

Les stockages de chaleur saisonniers sont utilisés dans certaines installations à énergie solaire avec pompe à chaleur. Ces stockages prennent différentes formes: réservoirs, aquifères, cavités, etc. Des méthodes d'analyse des caractéristiques de déperdition calorifique de ces stockages à long terme ont été étudiées depuis un certain nombre d'années à l'Université de Toronto. Le présent document traite de réservoirs de stockage verticaux de forme parfaitement cylindrique utilisant l'eau comme fluide de stockage. Ces réservoirs peuvent être construits hors-sols, enterrés à l'affleurement du sol ou partiellement enterrés. Dans ce dernier cas, la partie hors-sol de la paroi du réservoir peut être recouverte d'un talus, généralement constitué d'une partie ou de la totalité des déblais. Le talus assure l'isolation thermique de la paroi, lui fournit un certain appui, et évite l'accumulation des eaux de ruissellement.

Un document antérieur des mêmes auteurs, présenté lors de la Conférence de Stockholm en 1983, traitait d'une aide de conception graphique qui avait été développée pour prédire les effets des talus sur les caractéristiques de perte thermique de ces grands réservoirs de stockage saisonnier. Les résultats y étaient présentés sous l'aspect d'un "facteur de talus". Grâce à ce facteur, les pertes thermiques d'un réservoir partiellement enterré et entouré d'un talus d'une configuration quelconque peuvent être calculées et exprimées en pourcentage des pertes de chaleur d'un réservoir de dimensions semblables dont le sommet affleure le sol. On a découvert que le facteur de talus dépend de plusieurs paramètres, dont l'épaisseur d'isolant du réservoir et la conductivité du sol, mais le plus important était la forme et la géométrie du talus.

L'objectif principal des travaux décrits par le présent document était de rendre la méthode de conception développée plus générale et plus facile à utiliser au niveau

simple mathematical expression was first obtained which could be used to calculate the berm factor for any combination of berm size and geometry, thickness of tank insulation and soil conductivity. The expression chosen was of the form:

$$\text{Berm Factor} = (\alpha/90)^{\beta/10} \; / \; (1 - \beta \ln(\alpha/90))$$

where α is the berm angle (expressed in degrees), and β is a coefficient which depends upon berm height, soil conductivity and level of insulation. β was found to be a logarithmic function of both the soil conductivity and the berm height. The berm-factor expression was then calibrated, using the results obtained in the earlier investigations. An analysis was carried out to estimate the magnitude of the difference in the heat loss values predicted using the calibrated form of the simplified relationship, as compared to those predicted using the much more detailed numerical procedure. This analysis indicated that no significant loss of accuracy is introduced when the calibrated berm-factor is used to predict heat loss.

It is anticipated that the new method for calculating the heat loss from bermed storage tanks will prove most useful to designers. The principal advantage of the new method is that, because the berm factor is presented in a mathematical expression, it can be easily incorporated into existing computer models for calculating tank heat loss. The convenience of the new method is illustrated by means of a simple example.

de la conception. On a d'abord trouvé une expression mathématique simple pouvant être utilisée pour calculer le facteur de talus pour toute combinaison des principaux paramètres: dimensions et forme du talus, épaisseur d'isolant du réservoir et conductivité du sol. L'expression choisie était la suivante:

$$\text{Facteur de talus} = (\alpha/90)^{\beta/10} \; / \; (1 - \beta \ln(\alpha/90))$$

où α est l'angle d'inclinaison de talus (exprimé en degrés), et β est le coefficient tenant compte de la hauteur du talus, de la conductivité du sol et du degré d'isolation. Il a été démontré que β était une fonction logarithmique de la conductivité du sol et de la hauteur du talus. Le facteur de talus a ensuite été corrigé en se servant des résultats obtenus lors de travaux antérieurs. Une étude a été faite afin d'évaluer l'importance des différences entre les valeurs de perte thermique prédites au moyen de la forme corrigée de la relation simplifiée et les valeurs prédites grâce à la méthode numérique beaucoup plus détaillée. Les résultats ont démontré que l'exactitude des prédictions ne diminuait pas de façon importante lorsque le facteur de talus corrigé était utilisé.

On prévoit que la nouvelle méthode de calcul des pertes thermiques des réservoirs de stockage avec talus sera très utile aux concepteurs. Le principal avantage de cette nouvelle méthode tient au fait que le facteur de talus est exprimé sous forme mathématique, il peut donc facilement être intégré aux programmes informatiques existants afin de calculer les pertes de chaleur. La commodité de cette méthode est illustrée par un exemple simple.

QUALITY LOSS FROM SEASONAL STORING OF HEAT IN ROCK, MAGNITUDE AND EVALUATION

PERTE DE QUALITÉ D'UN STOCKAGE SAISONNIER DE CHALEUR DANS LA ROCHE, ORDRE DE GRANDEUR ET ÉVALUATION

G. Rosenblad
Chalmers University of Technology
Göteborg, Sweden

Three types of seasonal storages in rock are studied, i.e. caverns, boulder-filled caverns and borehole-storages.

Naturally, the leakages of heat from rock-storages are of importance and have long ago been taken into account. The quality losses, however, characterized by a temperature drop between loaded and unloaded heat, have never been discussed in spite of their importance.

Evidence is given that the differences in exergy between loaded and unloaded heat gives a good estimate of the total losses in energy and quality for a storage system.

Exergy losses have been calculated from computer results of the exit temperatures for storage cycles for the different storage types. The main results are:

1. Boulder- and borehole-storages have less heat losses than cavern-storages.

2. Caverns and boulder-storages have roughly the same exergy losses after deducting the exergy in heat losses. In borehole-storages the corresponding losses are 3.5 times larger in spite of a lower maximum temperature limit.

3. For borehole-storages the quality or exergy losses of the internal type, i.e. without exergy loss from heat loss, are percentually the same for different distances between the holes, if the storage volume and the temperature limits are the same. Unloaded heat will decrease if the hole-distances are increased, but the total length of all

Trois types de stockage saisonnier dans la roche ont été étudiés: les cavernes, les cavités remplies de blocs rocheux et les forages.

Les pertes de chaleur des stockages dans la roche sont importantes et ont déjà été prises en compte depuis longtemps. Les pertes qualitatives cependant, caractérisées par une baisse de la température au cours du "stockage" ou du "déstockage" de la chaleur, n'ont jamais été étudiées, en dépit de leur importance.

On a la preuve que la différence entre chaleur stockée et chaleur restituée fournit une bonne estimation des pertes totales d'énergie et de la qualité d'un réservoir de stockage.

Les pertes d'énergie ont été calculées au moyen du programme informatique des températures de sortie des cycles de plusieurs types de stockage d'énergie. Les principaux résultats sont les suivants:

1. Les cavités remplies de blocs rocheux et les forages connaissent moins de pertes de chaleur que les stockages en caverne.

2. Les stockages en caverne et les cavités de blocs rocheux ont approximativement les mêmes pertes nettes d'énergie. Dans les stockages forés, les pertes de chaleur correspondantes sont 3.5 fois supérieures en dépit d'une limite de température maximum plus basse.

3. Dans les stockages forés, la baisse de qualité ou les pertes d'énergie internes, c'est-à-dire sans compter les pertes de chaleur externes, sont en pourcentage les mêmes quel que soit l'espacement des trous forés, si le volume de stockage et les limites de températures sont les mêmes. La chaleur extraite diminue si les trous sont davantage espacés, mais la

the bored holes will decrease still more, which argues for large distances.

4. It is possible to increase the heat quantity from a storage if the lower temperature limit is decreased by a heat pump. That can be of economical interest for caverns and boulder-storages. A decrease of the lower temperature limit from 57° to 35°C rises the irreversible losses in a calculated example from 8 to 14%. For borehole-storages the same type of losses, however, are doubled from 25 to 50%, which seems unacceptable.

5. The performance of the storage types expressed as an exergy efficiency, i.e. including heat loss exergy and inner exergy losses, are the following:

Caverns 65% for	110-57°C
Boulder-storages 76% for	110-57°C
Borehole-storages 55% for	95-58/57°C

A borehole storage accepts only the maximal temperature 95°C because of the use of plastic material in the tubes leading the water of the storage down to the bottom of the holes.

6. The exergetic efficiency seems to be the best way to describe the total quality of a storage. The heat efficiency figures do not account for inner thermodynamic losses which may be of great importance for the use of the unloaded heat.

longueur totale de tous les trous forés diminue davantage; ce qui donne un meilleur rendement avec un espacement plus important.

4. Il est possible de récupérer davantage de chaleur d'un stockage si la limite de température inférieure est réduite par une pompe à chaleur. Cette méthode peut être économique aussi bien pour les cavernes que pour les cavités avec blocs rocheux. Une diminution de la température basse de 57 °C à 35 °C a fait augmenter les pertes irréversibles de 8 à 14 % dans un exemple de calcul. Pour les stockages par forages, ces mêmes pertes sont doublées et passent de 25 à 50 %, ce qui est inacceptable.

5. Les rendements des types de stockage exprimés en termes d'énergie, c'est-à dire en tenant compte des pertes de chaleur externes et internes sont les suivants:

En caverne 65 % pour	110-57 °C
Cavités remplies de blocs rocheux 76 % pour	110-57 °C
Trous forés 55 % pour	95-58/57 °C

Un stockage par forages ne peut avoir une température maximale supérieure à 95 °C parce que les tuyaux en plastique qui acheminent l'eau au fond des trous sont en plastique.

6. L'énergie semble être la meilleure valeur pour décrire la qualité globale d'un système de stockage. Les rendements thermiques ne tiennent pas compte des pertes thermodynamiques internes qui peuvent être d'une grande importance pour l'utilisation de l'énergie stockée.

EXPERIENCE FROM A LAKE HEAT SYSTEM AT Ö. GREVIE, SWEDEN

EXPÉRIENCE D'UN SYSTÈME THERMIQUE DANS UN LAC À Ö. GREVIE EN SUÈDE

T. Svensson
Chalmers University of Technology
Gothenburg, Sweden

At the time of the extension of some school buildings at Ö. Grevie in southern Sweden, a heating system based on two heat pumps at 134 kW each and an existing oil burner was installed. One of the heat pumps uses a small lake (area 18 000 m^2, mean depth 1,5 m) as a heat source and the other utilizes earth coils. The heating system was put into operation in December 198 .

Measurements of the performance of the heat pump system have been made for three heating seasons, with special emphasis on the lake as a heat source (natural heat storage). The measuring program includes energy input and output for the heat pumps, temperature levels in the brine systems and the hot water systems, and temperatures and heat flows in the lake and its sediments. Also some ecological studies have been made by scientists from the University of Lund. The performance of the heat pump system has been satisfactory with yearly coefficients of performance (COP) close to 2.5.

Heat extraction from the lake is made with a brine system consisting of 14 parallel PEL-pipes ø 40/3,6 placed on the bottom and partly submerged some dm in the loose sediments. A typical heat extraction rate during the winter is about 15 Watts per meter of pipe, with maximum values around 20 W/m. Freezing was observed around submerged pipes.

Near the bottom, temperatures between 1 and 4°C were measured during the winters. For an ice covered shallow lake, the main energy source is not the heat content of the water, but heat conduction from the warmer sediments, with typical rates of 1.5 - 3 W/m^2 in January-March. The total heat extraction from the lake in question amounts

Au moment de l'agrandissement de certains bâtiments scolaries à Ö. Grevie, dans le sud de la Suède, on a mis en place une installation de chauffage utilisant deux pompes à chaleur de 134 kW chacune ainsi qu'un brûleur à mazout existant. L'une des pompes utilise la chaleur d'un petit lac (superficie de 18 000 m^2, profondeur de 1.5 m) tandis que l'autre tire sa chaleur de la terre à l'aide de serpentins dans le sol. L'installation a été mise en service en décembre 1981.

Des mesures du rendement de l'installation ont été prises pendant trois saisons de chauffe, plus particulièrement sur l'utilisation du lac comme source de chaleur (stockage thermique naturel). Le programme comprend la mesure de l'énergie consommée et produite par les pompes à chaleur, les températures dans les canalisations de saumure et d'eau chaude, ainsi que les températures et flux thermiques dans le lac et ses sédiments. De plus, certaines études écologiques ont été faites par des chercheurs de l'Université de Lund. Les résultats obtenus sont satisfaisants avec des coefficients de rendement annuels proches de 2.5.

L'extraction de chaleur du lac se fait par un circuit de saumure constitué de 14 tuyaux de PEL parallèles de ø 40/3,6, posés sur le fond et en partie enterrés par quelques dm de sédiments mouvants. En hiver, le taux d'extraction type est d'environ 15 watts par mètre de tuyau, avec des pointes de 20 W/m. Il s'est formé de la glace sur les canalisations immergées.

Des températures variant entre 1 et 4 °C ont été enregistrées près du fond pendant l'hiver. Pour un lac peu profond et couvert de glace, la principale source d'énergie n'est pas la chaleur contenue dans l'eau, mais bien la chaleur dégagée (par conduction) des sédiments plus chauds, qui permettent des taux d'extraction de 1.5 à 3 W/m^2 de

to 2-3 W/m^2. It was concluded from an energy balance for February 1981 that the sediments of the entire lake must have provided heat to the brine system covering about half the lake. Density currents thus transport heat from warmer parts of the lake to the extraction area.

The present study shows the ability of small lakes and ponds to be used as heat sources for heat pumps. Compared to earth heat pump systems, larger continuous extraction rates may be maintained which makes lake heat pump systems especially suited for base load applications.

janvier à mars. Le taux d'extraction global du lac en question est de 2 à 3 W/m^2. Un bilan énergétique effectué en février 1981 a permis de conclure que les sédiments du lac ont dû fournir de la chaleur aux canalisations de saumure couvrant la moitié du lac. Les courants de densité transportent donc la chaleur des parties les plus chaudes du lac à la zone d'extraction.

La présente étude démontre les possibilités offertes par de petits lacs ou étangs pour des pompes à chaleur. Lorsqu'on compare aux pompes à chaleur dans le sol, on constate que celles qui utilisent l'eau du lac permettent de maintenir des taux d'extraction continue plus élevés, ce qui fait qu'elles sont particulièrement bien adaptées pour assurer des besoins de base.

DIURNAL THERMAL STORAGE

STOCKAGE THERMIQUE DIURNE

Robert T. Tamblyn
Engineering Interface Ltd.
Toronto, Canada

The growing need for load shifting in electric utility demand profiles is creating increased interest in day by day thermal storage.

Although the development of this concept has been based largely on the use of water tanks, heretofore, there is a strong move on the part of manufacturers to promote the medium of ice.

This paper will outline those situations which most favour the use of diurnal storage today and comment upon the pros and cons of ice vs water.

On s'intéresse maintenant de plus en plus au stockage thermique quotidien en raison de l'importance croissante qu'occupe la réduction des pointes dans les profils de consommation d'énergie électrique.

Jusqu'à maintenant, on a surtout utilisé le stockage de l'eau, mais une forte tendance se manifeste actuellement chez les fabricants pour l'utilisation de la glace.

Cette étude décrit les situations les plus propices au stockage quotidien et compare les avantages respectifs de la glace et de l'eau pour le stockage.

A FINITE DIFFERENCE MODEL FOR STRATIFIED CHILLED WATER THERMAL STORAGE TANKS

MODÈLE DE CALCUL DES DIFFÉRENCES FINIES POUR RÉSERVOIRS STRATIFIÉS DE STOCKAGE THERMIQUE D'EAU REFROIDIE

C. Randall Truman, Lyle G. Roybal, Maurice W. Wildin
University of New Mexico
Albuquerque, U.S.A.

A model for predicting the performance of stratified chilled water storage tanks is needed to aid in sizing such tanks and in evaluating the economic feasibility of thermal storage systems that employ such tanks. A model was developed as part of a larger EPRI-funded project that investigated alternate techniques of chilled water tank stratification. The model accounts for the primary factors that influence the performance of thermally-stratified water tanks, including: 1) conductive heat transfer within the walls and floor, and thermal storage in these elements; 2) heat transfer through the vertical temperature gradient in the water; 3) convective heat transfer between the water and the tank surfaces it contacts; 4) mixing near the inlet diffuser; and 5) heat transfer through resistive elements representing conductive or convective processes between the outer surfaces of the tank and its surroundings.

Comparison of results predicted by the model with experimental results obtained from two different inlet/outlet diffuser designs in approximately cubical 16,000 gal (60.5m^3) poured concrete tanks and 150 gal (0.6m^3) scale model tanks established the utility of the model. It has been demonstrated that the model is capable of predicting the thermal efficiency of these tanks within 8% for repeated cycles of operation representing various combinations of cooling load level and thermal storage operating strategies. The model satisfactorily predicted water temperature distributions in the tanks during charging and discharging and tank outlet temperatures during discharging for these repeated cycles. It also predicted the water temperature distribution and tank outlet temperature for flow rates up to three times the design value, i.e., for charging times

Un modèle permettant de prédire le comportement de réservoirs stratifiés pour stockage d'eau refroidie était requis pour aider au dimensionnement de ces réservoirs et pour évaluer la rentabilité des installations de stockage qui en sont équipées. Un modèle a été élaboré dans le cadre d'un projet plus vaste, financé par l'EPRI, dont le but était d'analyser de nouvelles techniques de stratification des réservoirs d'eau refroidie. Le modèle tient compte des principaux facteurs affectant le rendement des réservoirs d'eau à stratification thermique, y compris: 1) le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur des parois et du fond, ainsi que le stockage thermique dans ces éléments; 2) le transfert de chaleur entre les couches d'eau de différentes températures; 3) le transfert de chaleur par convection entre l'eau et les surfaces du réservoir avec lesquelles elle est en contact; 4) le brassage à proximité du diffuseur d'admission; et 5) le transfert de chaleur qui s'effectue par convection ou par conduction, à travers l'isolant, entre les surfaces extérieures du réservoir et le milieu qui l'entoure.

L'utilité du modèle a été prouvée par une comparaison entre les résultats prédits par ce moyen et les données expérimentales obtenues avec deux types de diffuseurs d'admission et de sortie dans des réservoirs de béton cubiques d'environ 16 000 gal. (60.5m^3) et avec des réservoirs à échelle réduite de 150 gal. (0.6m^3). Il a été démontré que le modèle permet de prédire, avec une erreur d'au plus 8 %, le rendement thermique de ces réservoirs pour des cycles répétés de fonctionnement représentant différentes combinaisons de charges de refroidissement et de stratégies de stockage thermique. Le modèle a permis de prédire de façon satisfaisante la répartition des températures dans l'eau des réservoirs pendant le remplissage et la vidange ainsi que les températures à la sortie des réservoirs pendant l'opération de vidange de

ranging from nine hours down to three hours. The primary restrictions on these results are that the tank had vertical walls and that the inlet temperature did not deviate widely from the value achieved after the start-up transient.

Because the finite difference model accounts for the major influences on the performance of stratified water tanks, it is thought to be applicable to a variety of tank geometries, diffuser designs and flow rates through storage. Guidelines for the range of applicability of the model to tanks with vertical walls for various diffuser designs and fluid flow rates have been derived in terms of dimensionless parameters from the test conditions for which the model has been checked. For tanks with non-vertical walls or for other major deviations from the conditions for which the model has been checked, modifications of the model may be necessary. Appropriate data for modifying the model input parameters or for checking modifications of the model may be obtained by using scale model tanks.

ces cycles répétés. Il a aussi pu prédire la répartition des températures et les températures de sortie pour des débits jusqu'à trois fois supérieurs au débit nominal, (remplissage effectué en 3 heures au lieu de 9). La principale restriction qu'on peut opposer à ces résultats tient au fait que le réservoir avait des parois verticales et que la température d'admission ne s'écartait pas beaucoup de la valeur atteinte après les températures de transition au début du remplissage.

Étant donné que le modèle de calcul des différences finies tient compte des principaux éléments influant sur le rendement des réservoirs à stratification, on croit qu'il peut être appliqué à des réservoirs de diverses configurations, équipés de différents types de diffuseurs et à des débits variés. Des lignes directrices concernant la gamme d'applicabilité du modèle aux réservoirs à parois verticales, avec différents diffuseurs et des débits variés ont été énoncées sous forme de paramètres non quantifiés à partir des conditions d'essai dans lesquelles le modèle a été vérifié. Des modifications au modèle peuvent s'avérer nécessaires dans le cas des réservoirs à parois non verticales et lorsqu'il existe des écarts importants par rapport aux conditions de vérification du modèle. Les données appropriées permettant de modifier les paramètres d'entrée du modèle ou de vérifier les modifications au modèle peuvent être tirées d'expériences sur des réservoirs à échelle réduite.

EXPERIENCE OF HEAT LOSS FROM AND TEMPERATURE DISTRIBUTION IN A WATER-FILLED DENSITY-STRATIFIED ROCK CAVERN

RÉPARTITION DE LA TEMPÉRATURE ET PERTES THERMIQUES DANS UN STOCKAGE D'EAU EN CAVITÉ ROCHEUSE

Bengt Vasseur
The Swedish State Power Board
Alvkarleby, Sweden

The heat storage in a 15 000 m^3 rock cavern at Avesta, Sweden utilizes the density difference between water of different temperatures to store energy as warm water above cooler water. In order to get a satisfactory function of the store the heat loss must not be too great and the density stratification must be preserved as intact as possible.

Experiences from measurements during two and a half years, with both short and long cycles, are shown in this paper. A numerical model is presented, which gives results in good agreement with the measurements. This includes not only the energy budget and the temperature distribution around the cave, but also the temperature stratification inside the cave.

L'installation de stockage thermique dans une cavité rocheuse de 15 000 m^3 à Avesta (Suède) utilise la variation de masse volumique de l'eau en fonction de la température, c'est-à-dire que l'eau chaude se trouve au-dessus. Pour que le stockage ait un rendement satisfaisant, les pertes thermiques ne doivent pas être trop élevées et la stratification de masses volumiques doit varier le moins possible.

Nous présentons dans ce document les résultats des mesures effectuées sur une période de deux ans et demi, en tenant compte des cycles courts et des cycles longs et un modèle numérique dont les résultats sont proches des mesures réelles. Le bilan énergétique est examiné, ainsi que la répartition des températures autour de la cavité et la stratification des températures à l'intérieur de la cavité.

LONG TERM HEAT ACCUMULATOR IN BERLIN (WEST GERMANY) - STORAGE CONSTRUCTION, FIRST RESULTS AND FURTHER DEVELOPMENTS

STOCKAGE THERMIQUE À LONG TERME À BERLIN (ALLEMAGNE DE L'OUEST) - CONSTRUCTION DE L'INSTALLATION, PREMIERS RÉSULTATS ET RÉALISATIONS

B. Voigt, EAB Energie-Anlagen Berlin GmbH, Berlin, F.R.G.
R. Ruhnau, Technical University of Berlin, Berlin, F.R.G.
L. Schilf, MBB Bremen, Bremen, F.R.G.

Referring to our presentation of the hydraulic and material fundamentals of a long term heat storage system at the "Subsurface heat storage conference in Stockholm 1983", we can state that the construction work of the heat accumulator is completed.

Pour faire suite à notre communication sur les caractéristiques hydrauliques et matérielles de base d'un stockage thermique à long terme, présentée à la "Conférence sur le stockage thermique souterrain" tenue à Stockholm en 1983, nous pouvons maintenant annoncer que la construction de l'installation de stockage thermique est terminée.

In 1984, the system was put into operation and first results shall be presented. The different steps of the construction and the measurement system will be illustrated and supported by slides. Due to difficulties encountered with the construction details of the lining, different solutions using various materials shall be shown as concrete examples.

L'installation fonctionne depuis 1984 et nous allons en exposer les premiers résultats. Les différentes étapes de construction et la méthode d'évaluation seront illustrées par des diapositives. Certaines difficultés ont surgi lors de la construction du revêtement et nous présenterons de façon concrète les différentes solution qui ont été mises en oeuvre.

Supported by the installed computerized measurement system, the distribution of temperature, the heat flows inside the constructions and the surrounding soil will be demonstrated.

Un système de mesure informatisé a permis de déterminer la répartition de la température ainsi que les flux thermiques dans les installations et le sol adjacent.

Based on the latest scientific findings it is already possible to recommend the dimensioning and necessity of thermal insulation in the different parts of the store. For the floating cover we developed evacuated stainless steel elements (vacuum super insulation). The excellent behaviour of their thermal heat insulation allow some further extendible applications, especially for the storage wall constructions and the pipes. The design of a long term heat storage system can be optimized by implementation of the vacuum super insulation because of its fundamental functions - thermal insulation and lining.

Il est déjà possible, grâce aux dernières données scientifiques obtenues, de recommander l'utilisation et le dimensionnement d'une isolation thermique dans les différentes parties du stockage. Le couvercle flottant est en acier inoxydable sous vide. L'excellent rendement de cette isolation thermique par le vide a permis d'en élargir les applications, surtout pour les parois du stockage et les conduits. L'installation de stockage thermique à long terme peut être optimisée par l'utilisation de cette super isolation par le vide comportant deux fonctions fondamentales, soit l'isolation thermique et le revêtement.

As a result of existing research work, it is possible to design linings out of bentonite layers according to their specific considerations. Dimensioning methods will be presented. Economic considerations regarding

Des recherches ont démontré qu'il est possible de fabriquer des revêtements en couches de bentonite. Les méthodes de dimensionnement seront présentées. Nous traiterons aussi de la rentabilité économique

the performance of long term heat accumulators will be discussed, based on the experiences of the pilot project in Berlin (West).

relative au rendement des stockages thermiques à long terme à partir du projet-pilote de Berlin-Ouest.

AUTHOR INDEX
INDEX DES AUTEURS

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
A		
Abyhammar, T.	A11	17
Abyhammar, T.	B16	71
Akiya, T.	D5	105
Allen, G.	D6	106
Allen, R.	A3	5
Alves, C.L.F.	D16	123
Andersson, S.	B4	55
Andersson, S.	B5	56
Ando, Y.	D5	105
Arthurs, D.M.	A4	7
Ausseur, J.Y.	A16	25
Ausseur, J.Y.	D23	135
B		
Bäckström, B.	B22	80
Bankston, C.A.	D1	99
Bénet, J.C.	B6	57
Benson, D.K.	D7	108
Berntsson, T.	D13	119
Biggiero, V.	A9	14
Blair, S.C.	A5	9
Blowes, D.W.	A22	34
Boileau, Y.	B1	51
Boisdet, A.	A6	10
Boisdet, A.	A20	31
Boldt, J.	A7	12
Boysen, A.	D2	100
Breger, D.S.	B7	59
Brett, C.E.	A8	13
Brunström, C.	D8	110
Bugaj, A.H.	D9	112
Buies, S.	C1	85
Burgeff, D.C.	E2	149
Burrows, R.W.	D7	108
C		
Cacciola, G.	D22	133
Carotenuto, A.	A9	14
Catan, M.	B2	52
Cayron, L.	E3	151
Chant, V.G.	A4	7
Charlier, M.	D10	114
Christensen, C.B.	D7	108
Chuard, D.	D14	120
Chuard, P.	D14	120
Claesson, J.	B8	61
Cohen, R.R.	E4	153

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
Crawford, A.	B9	62
Crawford, A.M.	A18	29
Crawford, A.M.	A21	33
D		
Dalenback, J.	B2	52
Dalenbäck, J-O.	D11	116
de la Morinière, O.	E5	155
Despois, J.	A13	20
Di Leonardo, R.	D22	133
Doughty, C.	A10	15
Dytczak, M.	D12	118
E		
Eriksson, A.	A11	17
Eriksson, A.	B5	56
Eskilson, P.	B8	61
F		
Ferrande, R.	B1	51
Francis, C.E.	C2	87
Francis, C.E.	C3	89
Franck, P-A.	D13	119
Frind, E.O.	A22	34
Fucci, F.	A9	14
G		
Gallichand, J.	C8	95
Granström, B.	C4	90
Gustafson, G.	E1	147
H		
Hadorn, J.C.	D14	120
Hahne, E.	D9	112
Hansen, K.K.	E6	157
Hansen, P.N.	E6	157
Hansen, P.N.	E7	159
Hausz, W.	D15	121
Hellström, G.	B10	63
Hellström, G.	B11	64
Hillström, C-G.	D8	110
Holm, T.	A12	18
Holm, T.R.	A14	22
Holst, P.	D8	110
Hooper, F.C.	E11	165
Housse, B.A.	A13	20

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
Hoyer, M.C.	A14	22
Hydén, H.	A15	24
Hydén, H.	B12	66
I		
Iris, P.	A16	25
Ishibashi, Y.	D5	105
Ismail, K.A.R.	D16	123
J		
Jacob, G.	C8	95
Johansson, S.	A11	17
Jouanna, P.	B6	57
Jouanna, P.	B18	74
K		
Kangas, M.T.	A17	27
Kanivetsky, R.	A14	22
Kani, M.	D6	106
Kannberg, L.D.	A1	3
Kannberg, L.D.	A28	43
Kawasaki, S.	D5	105
Kellner, J.	B12	66
Kincaid, C.T.	A28	43
Kjaerboe, P.	C4	90
Kjaerboe, P.	E8	160
Krischel, D.	D17	125
L		
La Fianza, G.	A9	14
Laitinen, T.	A17	27
Larsson, M.	D8	110
Lau, K.C.	A18	29
Lau, K.C.	A21	33
Lau, K.C.	B9	62
Lemieux, M.	C7	94
Lemmeke, L.	A19	30
Lenoir, Y.	D18	127
Leroy, G.	B13	67
Leskens, E.	D24	137
Lundin, S-E.	B3	53
Lund, P.D.	A17	27

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
M		
Margen, P.	B14	68
Marie, J-P.	B1	51
Marquette, C.J.	C5	91
Martna, J.	E9	161
Menjoz, A.	A6	10
Menjoz, A.	A20	31
Michaels, A.I.	B7	59
Mirza, C.	A18	29
Mirza, C.	A21	33
Monaghan, P.F.	D19	129
Morofsky, E.L.	A4	7
Morofsky, E.L.	A21	33
Morofsky, E.L.	C6	93
N		
Nakaiwa, M.	D5	105
Nevrala, D.J.	E4	153
Nordell, B.	B15	70
Nordell, B.	B16	71
Nordell, B.	D20	131
O		
Olsen, H.	A25	39
Ostensson, B.	D21	132
Owa, M.	D5	105
O'Donnell, G.N.	D19	129
P		
Palmer, C.D.	A22	34
Palmgren, C.	B10	63
Pang, B-Q.	A23	35
Pauzin, S.	E3	151
Plagge, J.	D26	140
Probert, S.D.	E4	153
Q		
Qvale, B.	A2	4
Qvale, B.	A25	39
R		
Radhakrishna, H.S.	B9	62
Reale, F.	A9	14
Recupero, V.	D22	133
Rehbinder, G.	E10	163

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
Restuccia, G.	D22	133
Rhen, I.	B17	72
Rhen, I.	B22	80
Rosenbl[illegible], G.	E12	167
Rosen, M.A.	E11	165
Roybal, L.G.	E15	172
Ruhnau, R.	E17	175
Rydell, B.	B10	63
S		
Sabel, H.	D3	101
Saix, C.	B6	57
Saix, C.	B18	74
Sauty, J.P.	A16	25
Sauty, J.P.	D23	135
Schaetzle, W.J.	A8	13
Schmied, H.	B5	56
Sehlberg, T.	B15	70
Sehlberg, T.	B16	71
Shen, G-J.	A23	35
Shinton, Y.D.	D7	108
Sneed, C.	D18	127
Snijders, A.L.	A24	37
Snijders, A.L.	A29	45
Sorensen, S.N.	A25	39
Sundberg, J.	B17	72
Sundberg, J.	B19	76
Sundlöf, B.	A19	30
Sun, Y-F.	A26	40
Su, H-y.	A26	40
Svensson, T.	E13	169
T		
Tamblyn, R.T.	C3	89
Tamblyn, R.T.	E14	171
Tang, Y-b.	A23	35
Tanton, D.M.	E4	153
Tollin, J.	B20	77
Truman, C.R.	E15	172
Tsang, C-F.	A10	15
Tsang, C-F.	A27	41
Turlejski, S.	D12	118
U		
Ussing, V.	E6	157

AUTHORS/AUTEURS	PAPER No./N° DE COMMUNICATION	PAGE
V		
Vail, L.W.	A28	43
Van de Perre, R.	D24	137
van der Bruggen, R.J.A.	A29	45
van Hattem, D.	B2	52
Van Loey, J.	D24	137
van Meurs, G.A.M.	B21	79
van Mourik, G.J.	D4	103
van Woerkom, A.A.F.	A24	37
Vasselin, P.H.	D25	138
Vasseur, B.	E16	174
Viennot, P.	A16	25
Vigneault, C.	C7	94
Vigneault, C.	C8	95
Voigt, B.	E17	175
W		
Walton, M.	A14	22
Wauters, P.	D10	114
Weik, H.	D26	140
Wijsman, A.J.Th.M.	B21	79
Wijsman, A.J.Th.M.	D27	142
Wildin, M.W.	E2	149
Wildin, M.W.	E15	172
Wilén, P.	A12	18
Wilén, P.	B22	80
Wilt, M.J.	A27	41
Z		
Zhao, B.	A30	47
Zhao, R.	A30	47
Zinko, H.	D8	110

Public Works Canada
Travaux publics Canada

Energy, Mines and Resources Canada
Énergie, Mines et Ressources Canada